



OBSERVATIONS OF IONOSPHERIC DISTURBANCES VIA U-SHAPED TRACES ON IONOGRAMS

O. A. Laryunin

Institute of Solar-Terrestrial Physics, Siberian Branch of RAS, Irkutsk, Russia

Abstract: The ionospheric vertical sounding is a basic technique for studying the Earth's ionosphere. Taking into account the fact that conditions for propagation of radio waves depend on the operating frequency, diagnostics of the ionosphere is performed using digital ionosondes that measure the delays of decameter radio signals of different frequencies. An ionogram is a display of the data produced by an ionosonde. It is a graph of the virtual reflection height of the ionosphere (actually, time between transmission and reception of a radio signal) versus sounding frequency. Vertical and near-vertical ionograms provide the major share of information about the space-temporal structure of the ionospheric plasma above the ionosonde. Of particular interest is investigating dynamic processes from the series of ionograms taken once each minute. Studying seismic ionospheric effects by minute ionograms can be highly informative. It is known that the parameters of the ionospheric layers can significantly vary both before and after an earthquake, and such deviations are detectable from ionosonde data. Recent observations show that the effects from an earthquake can occur at large distances from the epicenter. For instance, soundings in the Irkutsk region detected the anomalies that occurred several dozens of minutes after the main shock of the 11.03.2011 earthquake in Japan. At the initial phase, the anomaly was recorded as a multicusp structure in the ionogram, which was probably related to the multiple layers of the ionosphere. This structure was interpreted by iterative reconstruction of the electron density profile in a one-dimensional approximation (stratified ionosphere), and the interpretation was published. At the next phase, the ionograms showed a U-shaped structure with a specific multiple reflection. Multipath propagation is usually associated with additional off-vertical ray paths, which are caused by traveling ionospheric disturbances (TIDs). In this regard, it is appropriate to use a 2D model of electron density, depending on both the vertical and horizontal coordinates. In our study, geometric optics approximation was used to simulate vertical ionograms under the conditions of strong horizontal gradients of electron density. The study results show that different positions of the U-shaped structure with respect to the main trace of the ionogram can be obtained for a single TID. Specific ray paths forming the additional traces of the ionogram are described. Depending on the TID location, the U-shaped structure can occur with or without a specific multipath reflection.

Key words: ionosphere; traveling ionospheric disturbance (TID); ionogram

Статья публикуется по материалам доклада, сделанного авторами на XII Российско-Монгольской международной конференции «Солнечно-земные связи и геодинамика Байкало-Монгольского региона» (1–5 октября 2018 г., г. Иркутск)

RESEARCH ARTICLE

Received: November 27, 2018

Revised: March 25, 2019

Accepted: April 3, 2019

For citation: Laryunin O.A., 2019. Observations of ionospheric disturbances via U-shaped traces on ionograms. *Geodynamics & Tectonophysics* 10 (3), 655–662. doi:10.5800/GT-2019-10-3-0432.

НАБЛЮДЕНИЯ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ С ПОМОЩЬЮ U-ОБРАЗНЫХ ТРЕКОВ НА ИОНОГРАММАХ

О. А. Ларюнин

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация: Метод вертикального радиозондирования по-прежнему остается базовым при изучении ионосферы Земли. Условия распространения радиоволн зависят от рабочей частоты, поэтому для диагностики ионосферы применяются ионозонды, измеряющие задержку декаметрового радиосигнала различной частоты. Продуктом работы ионозонда являются ионограммы, которые в виде высотно-частотной характеристики представляют собой зависимость действующей высоты отражения (или времени, за которое радиосигнал достигает точки отражения и возвращается обратно) от рабочей частоты. Ионограммы вертикального и слабонаклонного зондирования дают львиную долю сведений о пространственно-временной структуре ионосферной плазмы над точкой зондирования. При этом особый интерес представляет исследование динамических процессов на основе последовательности ионограмм с высоким временным разрешением. Так, информативным представляется, в частности, исследование сейсмоионосферных эффектов по минутным ионограммам. Известно, что существенные отклонения параметров ионосферных слоев по данным ионозондов могут наблюдаться и до, и после землетрясения. При этом эффекты землетрясений могут проявляться на больших расстояниях от эпицентра. Так, данные зондирования в Иркутской области демонстрируют аномалии, которые последовали через несколько десятков минут после главного толчка землетрясения в Японии 11 марта 2011 г. В начальной фазе аномалия проявилась в мультикасповой структуре на ионограмме, вероятно связанной со множественными расслоениями в ионосфере. Интерпретация структуры данного типа проводится итерационным методом восстановления профиля электронной концентрации в одномерном приближении (слоистая среда) и описана в литературе. В последующей фазе на ионограммах проявилась серповидная структура с характерной многолучевостью. Множественное распространение обычно связано с появлением дополнительных, отклоненных от вертикали лучевых траекторий, вызванных перемещающимся ионосферным возмущением. В этой связи было целесообразно перейти к двумерной модели электронной концентрации с зависимостью как от вертикальной, так и от горизонтальной координаты. Таким образом, в рамках данной работы на основе приближения геометрической оптики проведено имитационное моделирование ионограмм вертикального зондирования в условиях ионосферы с сильными горизонтальными градиентами электронной концентрации. Показано, что различное расположение серповидной структуры относительно основного трека ионограммы может быть получено в рамках прохождения одного перемещающегося ионосферного возмущения. Представлены характерные лучевые траектории, формирующие дополнительные треки ионограммы. Показано, что в зависимости от положения возмущения серповидная структура может появляться как при наличии многолучевости, так и без нее.

Ключевые слова: ионосфера; перемещающиеся ионосферные возмущения; ионограмма

1. ВВЕДЕНИЕ

Ионосферные эффекты, предшествующие и следующие за землетрясениями, изучаются уже долгое время на основе различных радиофизических инструментов. Так, по данным спутников GPS исследуются вариации полного электронного содержания (TEC), связанные с землетрясениями [Liu et al., 2004]. Отмечается, что максимум вариаций TEC обычно располагается в близости от эпицентра [Klimenko et al., 2011]. Исследования сейсмоионосферных эффектов также активно проводятся по данным наземного радиозондирования [Pulinets et al., 2015, 2018]. Показано, что значимые отклонения критической частоты слоя F2, а также изменения параметров слоя E зачастую наблюдаются в перио-

ды подготовки сильных коровых землетрясений [Chistyakova et al., 2012; Khagai et al., 2013]. При этом станции ионосферного зондирования в ряде случаев демонстрируют эффекты землетрясений на больших расстояниях от эпицентра. Так, в работе [Berngardt et al., 2015] рассмотрены аномалии на ионограммах слабонаклонного зондирования Усолье-Торы (Иркутская область, дальность радиотрассы составляет 120 км), которые последовали через несколько десятков минут после главного толчка землетрясения в Японии 11 марта 2011 г. На рис. 1, б, показана т.н. «мультикасповая» структура (multicusp) на ионограмме, которая связана с множественными расслоениями в ионосфере над радиотрассой. Была описана методика восстановления высотного профиля электронной концен-

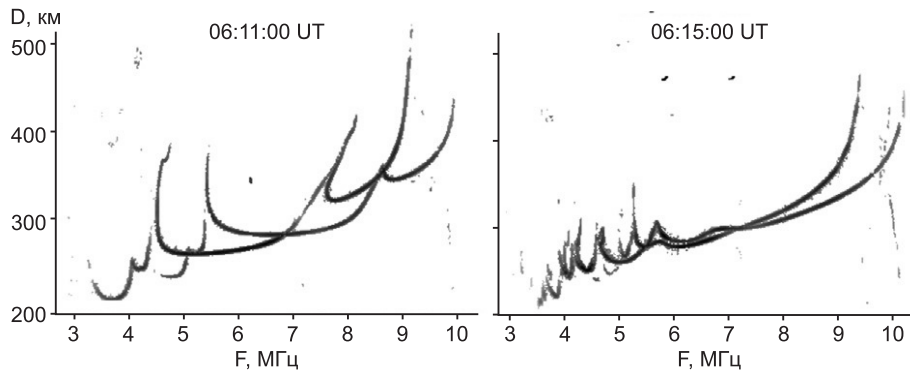


Рис. 1. Ионограммы слабонаклонного зондирования Усолье-Торы. 11 марта 2011 г. (из работы [Berngardt et al., 2015]).

Fig. 1. Low-angle sounding ionograms for Usolie-Tory. March 11, 2011 (after [Berngardt et al., 2015]).

трации в приближении слоистой ионосферы для данной аномальной ионограммы [Berngardt et al., 2015].

Однако анализ структуры типа «серп» с характерной многолучевостью, представленной на рис. 1, а (U-образный трек), уже не может проводиться в одномерном приближении, а требует вве-

дения электронной концентрации как функции горизонтальной и вертикальной координаты, $N(x, z)$. Таким образом задается ионосферное возмущение. При определенных параметрах и положениях возмущения возможно появление боковых (отклоненных от вертикали) траекторий распространения радиосигнала, которые и определяют многолучевость.

2. МЕТОДЫ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА

Одним из способов численного расчета характеристик радиоволн может служить метод нормальных волн [Oynats, 2009]. Также в последнее время получил развитие вариационный метод поиска лучей при расчете радиотрасс [Coleman, 2011; Nosikov et al., 2016]. При этом приближение геометрической оптики (ГО) [Kravtsov, Orlov, 1980], видимо, остается наиболее общепринятым методом расчета лучевых траекторий. В рамках данной работы метод ГО используется без учета магнитного поля Земли (изотропное приближение).

Траекторный синтез ионограмм в данной работе выполнен на базе лучевого подхода. В приближении ГО лучевые уравнения могут быть записаны в виде:

$$\frac{d^2 \vec{r}}{d\tau^2} = \frac{1}{2} \nabla \varepsilon, \quad (1)$$

где $\vec{r}$ – радиус-вектор луча, τ – групповой путь волны, $\varepsilon = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} = 1 - \frac{Ne^2}{\varepsilon_0 m \omega^2}$ – диэлектрическая проницаемость среды, e и m – заряд и масса электрона, ε_0 – диэлектрическая постоянная, N – электронная концентрация, ω – частота сигнала, ω_p – плазменная частота [Kravtsov, Orlov, 1980].

В двумерном случае соотношение (1) преобразуется в систему уравнений:

$$\frac{d^2 x}{d\tau^2} = \frac{1}{2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x}, \quad \frac{d^2 z}{d\tau^2} = \frac{1}{2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z}. \quad (2)$$

Аналитическое решение системы дифференциальных уравнений (2) возможно лишь для ограниченного числа простейших частных случаев. Для произвольного вида зависимости $\varepsilon(x, z)$ актуально численное решение системы (2) с начальными условиями вида

$$x(\tau = 0) = z(\tau = 0) = 0; \quad \frac{dx(\tau=0)}{d\tau} \sin \varphi_0; \quad \frac{dz(\tau=0)}{d\tau} \cos \varphi_0. \quad (3)$$

Далее реализуется алгоритм двумерной пристрелки лучей: для заданной рабочей частоты рассчитывается набор лучевых траекторий в выбранном диапазоне углов излучения φ_0 с фиксированным шагом $\Delta\varphi$.

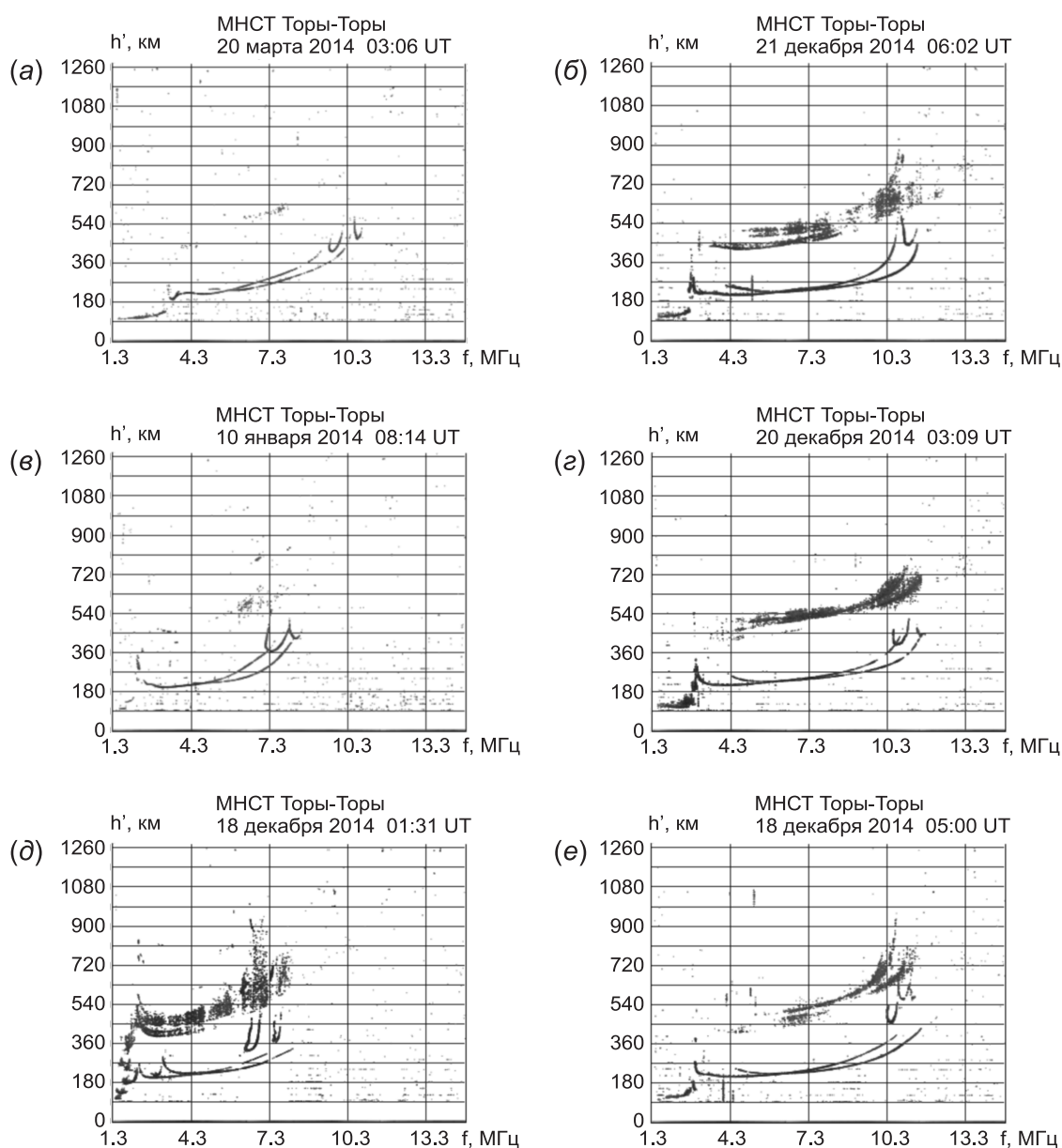


Рис. 2. Ионограммы вертикального зондирования с характерными серповидными структурами.

Fig. 2. Vertical sounding ionograms showing specific U-shaped patterns.

Полученный набор траекторий позволяет, используя сплайн-интерполяцию полиномами третьей степени, построить дальностно-угловую характеристику $D(\varphi)$. Далее, в случае вертикального зондирования, задача сводится к численному решению уравнения $D(\varphi) = 0$. Групповой путь, отвечающий найденным траекториям, даст одну или несколько (в случае многолучевости) точек на ионограмме. Наконец, повторение описанной процедуры для различных рабочих частот позволяет построить трек ионограммы.

3. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Серпы на ионограммах могут иметь различную ширину – от долей до единиц мегагерц. Кроме того, серп в начальной фазе своего проявления может находиться как «вне ионограммы», т.е. на частотах, превышающих критическую, так и внутри ионограммы. Возможны также промежуточные случаи, когда критическая часть ионограммы рассекает серп на две части.

На рис. 2 представлены характерные ионограммы типа «серп снаружи» (рис. 2, а, б), «критическая проходит через серп» (рис. 2, в, г) и «серп внутри» (рис. 2, д, е).

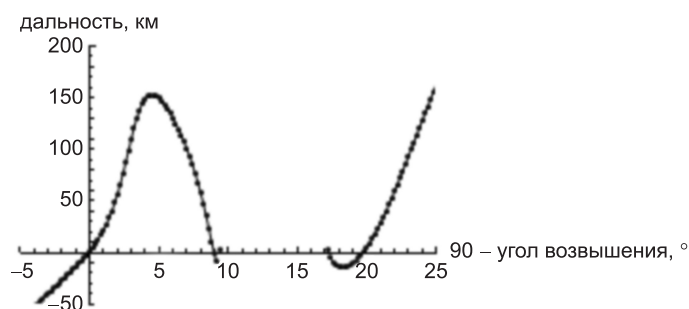


Рис. 4. Дальностно-угловая характеристика для среды, показанной на рис. 3, з. Частота $f=8.42$ МГц. Угол 0° в начале координат соответствует вертикальному лучу.

Fig. 4. Distance-angular characteristic for the medium shown in Fig. 3, z. Frequency $f=8.42$ MHz. Angle 0° at the coordinate start point corresponds to the vertical ray.

Рис. 3, б, демонстрирует лучевую картину для частоты 8.6 МГц. Основной трек ионограммы здесь образуют квазивертикальные траектории, тогда как серпу соответствуют большие значения групповых задержек, которые возникают за счет боковых отражений от удаленной по горизонтали структуры. Следует также отметить закономерное десятипроцентное увеличение критической частоты основного трека до 9.35 МГц.

При горизонтальном смещении возмущения до $x_0 = 150$ км синтезированная ионограмма приобретает вид, показанный на рис. 3, в. Можно видеть, что в определенном частотном интервале имеют место три луча. Однако траекторный синтез показывает, что лучей, строго говоря, четыре. Это связано с взаимностью петлеобразного луча: если угол излучения задать равным углу прихода, то радиоволна будет распространяться в обратном направлении по той же траектории (рис. 3, з, $f = 8.42$ МГц). На рис. 4 показана дальностно-угловая характеристика для среды, представленной на рис. 3, з. Следует отметить, что петлеобразные траектории дают большие групповые задержки и соответствуют верхней левой части серпа (см. рис. 3, в).

Наконец, при последующем смещении отражающей структуры вправо до $x_0 = 175$ км многолучевость исчезает (см. рис. 3, д, е). Критическая частота основного трека здесь снова составляет 8.5 МГц (в отличие от рис. 3, а), так как возмущение достаточно удалено и не влияет на вертикальные траектории. На рис. 3, е, показано боковое отражение на частоте 9 МГц.

Следует отметить некое визуальное сходство рассмотренных ионограмм и летних дневных ионограмм, для которых характерно расслоение (рис. 5). Однако природа явления здесь принципиально другая. Летние расслоения дают намного более широкий серп, динамика которого слабо выражена. Для моделирования

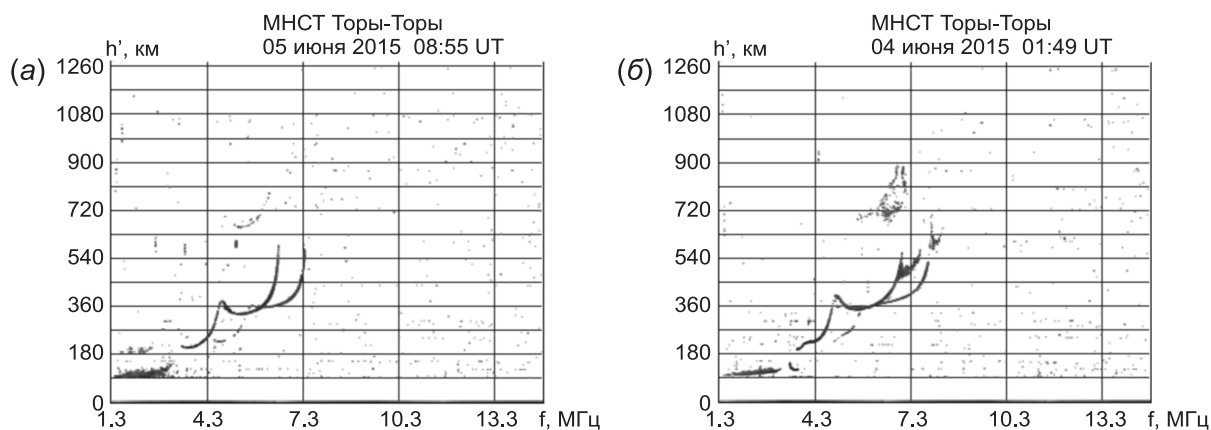


Рис. 5. Летние ионограммы с характерным расслоением.

Fig. 5. Summer-time ionograms showing typical stratification patterns.

такой структуры достаточно нарушить монотонность высотного профиля электронной концентрации, формируя так называемую «долину». При этом горизонтальный градиент электронной концентрации здесь, в отличие от классических серпов, не требуется. Отметим, что два указанных явления могут иметь место одновременно (рис. 5, б).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение сейсмоионосферных эффектов остается сложнейшей проблемой геофизики. Мультиинструментальные наблюдения имеют в данном контексте определяющее значение [Berngardt et al., 2013]. Однако, с одной стороны, наземные средства радиозондирования не могут дать полной информации о динамических характеристиках ассоциированных ионосферных возмущений в силу отсутствия плотной сети ионозондов. С другой стороны, даже при непрерывных наблюдениях малое временное разрешение большинства станций вертикального зондирования ограничивает возможности анализа быстротекущих событий. Так, для оперативной диагностики ионосферы экспериментальные данные станций зондирования в п. Торы, работающих в режиме непрерывного мониторинга с минутным разрешением, представляются в некотором роде уникальными.

Предложенная в работе модель перемещающегося ионосферного возмущения показала свою состоятельность с точки зрения описания серповидных структур нескольких типов. Следует отметить, что выбор гауссиана и косинуса в предложенной модели не является обязательным и единственно

верным. Однако принципиальным моментом при выборе модели, видимо, должно быть чередование областей повышенной и пониженной электронной концентрации, на стыке которых возможно образование возвратных и петлеобразных траекторий, приводящих к многолучевости.

Отметим, что обратная задача восстановления неоднородной структуры ионосферы по серпам на ионограмме в двумерном случае неоднозначна и методически сложна. На практике она обычно сводится к многократному решению прямой задачи (с перебором параметров возмущения) и последующему фитированию [Kurkin et al., 2014; Laryunin, 2018].

5. БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность А.В. Подлесному за подготовленные экспериментальные данные. Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>. Работа выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ И.12.

6. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Berngardt O.I., Dobrynina A.A., Zherebtsov G.A., Mikhalev A.V., Perevalova N.P., Ratovskii K.G., Rakhmatulin R.A., San'kov V.A., Sorokina A.G., 2013. Geophysical phenomena accompanying the Chelyabinsk meteorite fall. *Doklady Earth Sciences* 452 (1), 945–947. <https://doi.org/10.1134/S1028334X13090080>.
- Berngardt O.I., Kotovich G.V., Mikhailov S.Y., Podlesnyi A.V., 2015. Dynamics of vertical ionospheric inhomogeneities over Irkutsk during 06: 00–06: 20UT 11/03/2011 caused by Tohoku earthquake. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 132, 106–115. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.07.004>.
- Chistyakova L.V., Korsunova L.P., Podlesny A.V., Khagai V.V., 2012. Ionospheric variations over Irkutsk before strong earthquakes in Tuva. *Solar-Terrestrial Physics* (20), 103–108 (in Russian) [Чистякова Л.В., Корсунова Л.П., Подлесный А.В., Хегай В.В. Изменения в ионосфере над Иркутском перед сильными землетрясениями в Туве // *Солнечно-земная физика*. 2012. № 20. С. 103–108].
- Coleman C.J., 2011. Point-to-point ionospheric ray tracing by a direct variational method. *Radio Science* 46 (5), RS5016. <https://doi.org/10.1029/2011RS004748>.
- Khagai V.V., Legen'ka A.D., Kim V.P., 2013. Anomalous variations in the foF2 critical frequency above Japan prior to the earthquake of March 9, 2011. *Geomagnetism and Aeronomy* 53 (4), 529–533. <https://doi.org/10.1134/S0016793213040099>.
- Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharenkova I.E., Pulinet S.A., 2011. Numerical simulation of ionospheric precursors of strong earthquakes in high, middle and low latitudes. *Proceedings of the Kaliningrad State Technical University* (20), 40–47 (in Russian) [Клименко М.В., Клименко В.В., Захаренкова И.Е., Пулинец С.А. Численное моделирование ионосферных предвестников сильных землетрясений в высоких, средних и низких широтах // *Известия Калининградского государственного технического университета*. 2011. № 20. С. 40–47].
- Kravtsov Yu.A., Orlov Yu.I., 1980. Geometrical Optics of Inhomogeneous Media. Nauka, Moscow, 306 p. (in Russian) [Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука, 1980. 306 с.].

- Kurkin V.I., Laryunin O.A., Podlesny A.V., Lukin D.S., Chernyak Ya.M., Kryukovsky A.S., Rastyagaev D.V., 2014. Study of quasi-wave ionospheric disturbances using amplitude maps. *Nelineinyi Mir (Nonlinear World)* (12), 12–19 (in Russian) [Куркин В.И., Ларюнин О.А., Подлесный А.В., Лукин Д.С., Черняк Я.М., Крюковский А.С., Растягаев Д.В. Исследование квазипериодических ионосферных возмущений с помощью амплитудных карт // *Нелинейный мир*. 2014. № 12. С. 12–19].
- Laryunin O.A., 2018. Estimating the characteristics of traveling ionospheric disturbances from vertical incidence ionograms within a compound parabolic layer model. *Geomagnetism and Aeronomy* 58 (2), 245–251. <https://doi.org/10.1134/S0016793218020147>.
- Liu J.Y., Chuo Y.J., Shan S.J., Tsai Y.B., Chen Y.I., Pulinets S.A., Yu S.B., 2004. Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurements. *Annales Geophysicae* 22 (5), 1585–1593. <https://doi.org/10.5194/angeo-22-1585-2004>.
- Nosikov I.A., Bessarab P.F., Klimenko M.V., 2016. Method of transverse displacements formulation for calculating the HF radio wave propagation paths. Statement of the problem and preliminary results. *Radiophysics and Quantum Electronics* 59 (1), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s11141-016-9670-1>.
- Oynats A.V., 2009. Numerical Simulation of the Characteristics of Decameter Radio Signals in the Framework of the Method of Normal Waves. Author's brief thesis (Candidate of Physics and Mathematics). Institute of Solar-Terrestrial Physics, Irkutsk, 28 p. (in Russian) [Ойнац А.В. Численное моделирование характеристик декаметровых радиосигналов в рамках метода нормальных волн: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Иркутск: ИСЗФ СО РАН, 2009. 28 с.].
- Pulinets S.A., Legen'ka A.D., Hegai V.V., Kim V.P., Korsunova L.P., 2018. Ionosphere disturbances preceding earthquakes according to the data of ground based station of the vertical ionospheric sounding Wakkanai. *Geomagnetism and Aeronomy* 58 (5), 686–692. <https://doi.org/10.1134/S0016793218050110>.
- Pulinets S.A., Ouzounov D.P., Karelin A.V., Davidenko D.V., 2015. Physical bases of the generation of short-term earthquake precursors: A complex model of ionization-induced geophysical processes in the lithosphere-atmosphere-ionosphere-magnetosphere system. *Geomagnetism and Aeronomy* 55 (4), 521–538. <https://doi.org/10.1134/S0016793215040131>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ | INFORMATION ABOUT AUTHOR

Олег Альбертович Ларюнин

канд. физ.-мат. наук

Институт солнечно-земной физики СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 126А, Россия

✉ e-mail: laroleg@iszf.irk.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-2830-2815>

Oleg A. Laryunin

Candidate of Physics and Mathematics

Institute of Solar-Terrestrial Physics, Siberian Branch of RAS
126A Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia