

## **Влияние внезапного стратосферного потепления на характеристики среднемасштабных перемещающихся ионосферных возмущений в азиатском регионе России**

В.И.Куркин<sup>1</sup>, И.В. Медведева<sup>1</sup>, А.В.Подлесный<sup>1</sup>, З.Ф. Думбрава<sup>2</sup>, И.Н. Поддельский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН (ИСЗФ)

664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126А

E-mail: vikurkin@yandex.ru, ivmed@iszf.irk.ru, pav1986@rambler.ru

<sup>2</sup>Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Камчатский край, п. Паратунка, ул. Мирная, 7

E-mail: labfiz@vzm.kht.ru, [podd-igor@yandex.ru](mailto:podd-igor@yandex.ru),

*На основе данных системы радиотрасс ЛЧМ зондирования на средних и субавроральных широтах азиатского региона России исследованы особенности среднемасштабных перемещающихся ионосферных возмущений (СМ ПИВ) в зимний и весенний сезоны 2016 года. Выявлены характерные суточные вариации вероятности появления и времени регистрации СМ ПИВ на трассах различной ориентации. Проведен анализ влияния внезапного стратосферного потепления (ВСП) типа "minor" в феврале 2016 г. и финального потепления в марте 2016 г. на характеристики СМ ПИВ в азиатском регионе России.*

*Ключевые слова:* ионозонд, вертикальное и наклонное зондирование ионосферы, перемещающиеся ионосферные возмущения

## **The effect of sudden stratospheric warming on the characteristics of medium-scale travelling ionospheric disturbances in the Asian region of Russia**

V. I. Kurkin<sup>1</sup>, I. V. Medvedeva<sup>1</sup>, A. V. Podlesnyi<sup>1</sup>, Z.F. Dumbrava<sup>2</sup>, I.N. Poddelskyi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS

<sup>1</sup>Institute of cosmophysical research and radio wave propagation FEB RAS

684034 Kamchatka region, Elizovskiy district, Paratunka, Mirnaya str., 7.

*Based on the data of the LFM sounding radio path system at the middle and subauroral latitudes of the Asian region of Russia, the features of medium-scale travelling ionospheric disturbances (TID) in the winter and spring seasons of 2016 were investigated. Characteristic diurnal variations of the probability of occurrence and time of registration of TID along paths of different orientations were revealed. The analysis of the impact of the minor sudden stratospheric warming (SSW) in February 2016 and of the final warming in March 2016 on the characteristics of the TID in the Asian region of Russia was carried out.*

*Keywords:* ionosonde, vertical and oblique sounding of the ionosphere, Travelling ionospheric disturbances

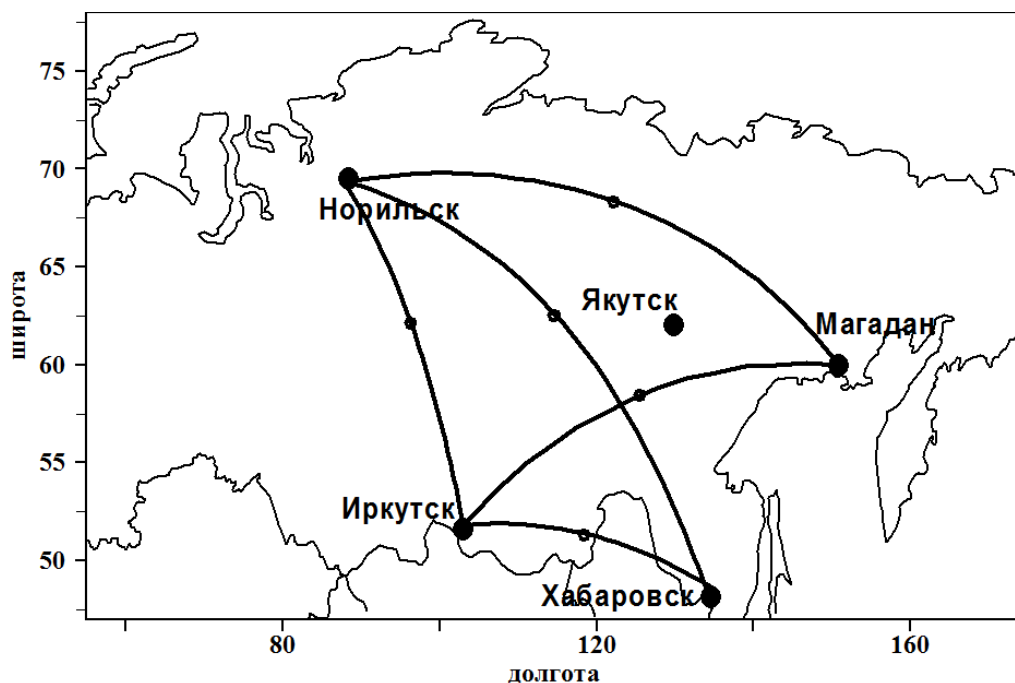
### **Введение**

Исследования среднемасштабных перемещающихся ионосферных возмущений (СМ ПИВ) с помощью ионозондов наклонного зондирования имеет длительную историю (см., например, [1-3]). Ввиду существенного влияния СМ ПИВ на многолучевость КВ ионосферного радиоканала и трудности прогнозирования их появления реализуются многолетние национальные и международные программы исследования СМ ПИВ с использованием систем радиотрасс наклонного зондирования (НЗ) [4-7]. В России аналогичные многолетние исследования активно ведутся в её

европейской части [8-9]. В азиатском регионе России СМ ПИВ исследуются как с использованием многопозиционных измерений на Иркутском радаре некогерентного рассеяния и дигизонде DPS-4 [10], так и на системе радиотрасс наклонного ЛЧМ зондирования ионосферы [11]. В результате анализа экспериментальных данных и численного моделирования выявлены характерные масштабы и характеристики СМ ПИВ, приводящие к появлению на ионограммах НЗ искажений Z-типа, обусловленных многолучевостью [8, 12-13]. Установлена статистическая связь характеристик СМ ПИВ светровыми характеристиками нейтральной атмосферы [14-15]. Однако, многообразие потенциальных источников СМ ПИВ и широкий диапазон их собственных характеристик оставляет еще много неясных вопросов в их прогнозировании и возможном использовании для диагностики динамических характеристик нейтральной атмосферы. В данном докладе приведены результаты морфологического анализа характеристик СМ ПИВ, регистрируемых на ионограммах наклонного зондирования на системе односкачковых радиотрасс в азиатском регионе России, для зимнего и весеннего сезонов 20016 года. Проведено исследование влияния на характеристики СМ ПИВ возмущений в атмосфере азиатского региона России, обусловленных внезапным стратосферным потеплением минорного типа в феврале 2016 года и финальным потеплением в марте 2016 года.

### Экспериментальные данные

Мы использовали данные наклонного зондирования (НЗ) ионосферы непрерывным сигналом с линейной модуляцией частоты (ЛЧМ сигнал) в диапазоне 6-30 МГц на системе из пяти радиотрасс (рис.1) с использованием аппаратуры, разработанной в ИСЗФ СО РАН и послужившей основой для многофункционального ЛЧМ ионозонда “Ионозонд-МС” для мониторинга ионосферы [16].



**Рис. 1. Система радиотрасс наклонного ЛЧМ зондирования ионосферы в азиатском регионе России.**

Основной особенностью “Ионозонда-МС” (рис.2) является наличие большого количества программно-контролируемых независимых приёмных каналов и высокий динамический диапазон радиоприёмных устройств с использованием программно-определяемых радиосистем. Это позволяет реализовывать наблюдения сразу

несколькими методами одновременно, не требуя при этом временного разнесения циклограмм их работы. Приёмное устройство “Ионозонда-МС” представляет собой многоканальный приёмник ЛЧМ сигналов, построенный с использованием программно-определяемых радиосистем по схеме прямой оцифровки с широкополосным неперестраиваемым преселектором на входе. Специальное программное обеспечение позволяет производить автоматическое формирование кадров ЛЧМ зондирования в соответствии с режимами, заданными в программе наблюдений и обеспечивает непрерывную автономную работу комплекса в режиме автоматического сбора данных и отправки их в удалённое хранилище. Диапазон возможных параметров работы каждого из независимых программных каналов обработки принятых сигналов обеспечивает совместимость с отечественными и зарубежными ЛЧМ ионозондами. Для обеспечения надёжной синхронизации и коррекции местной шкалы времени используется высокостабильный источник опорной частоты, подстраиваемый по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Его роль выполняет специализированный (синхронизирующий) приёмник сигналов ГНСС со встроенным термостатированным подстраиваемым кварцевым генератором и собственной шкалой времени на его основе.



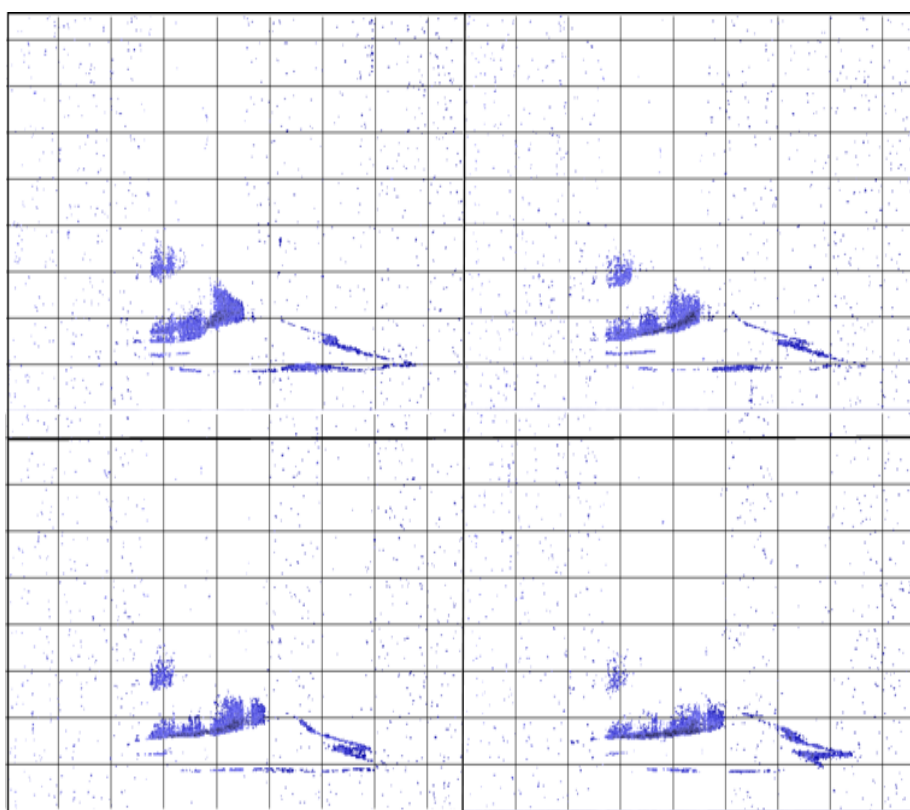
**Рис. 2. Внешний вид ЛЧМ ионозонда “Ионозонд-МС”.**

Передающая часть ионозонда выполнена на основе микросхемы синтезатора прямого цифрового синтеза и блочного твердотельного усилителя мощности. Синтезаторы на основе прямого цифрового синтеза не имеют сравнимой по функциональности и качеству выходного сигнала альтернативы. Система управления передающей частью ионозонда содержит программно-алгоритмические и технические средства для установки параметров: режимов зондирования, автоматической работы с заданной периодичностью, поддержания заданной точности привязки, текущего контроля циклов работы и нестабильности опорного генератора.

Для формирования ЛЧМ сигналов в разработанном ионозонде применяется плата AD9854/PCB, представляющая законченное устройство, в состав которой входят: чип цифрового 48-и разрядного синтезатора прямого синтеза AD9854ASQ, фильтр нижних частот с частотой среза 120 МГц, параллельный и последовательный интерфейсы для подключения синтезатора к персональному компьютеру. AD9854ASQ является высоко интегрированным устройством, использующим современную технологию прямого

цифрового синтеза DDS (Direct Digital Synthesizer) и позволяющим синтезировать сигналы с точностью установки частоты до 1 микроГерц в диапазоне частот 0,000001 Гц – 150 МГц при тактовой частоте 300 МГц. 12 разрядный ЦАП на выходе синтезатора позволяет получить высокие характеристики по реальному динамическому диапазону и отношению сигнал/шум синтезированного ЛЧМ сигнала. В качестве широкополосного оконечного усилителя мощности был использован полупроводниковый блочный усилитель LZY-22, производства Minicircuits. Данный усилитель имеет встроенный блок питания, цепи защиты от перегрева и максимальную выходную мощность 30 Вт.

Три ЛЧМ передатчика, расположенных на обсерваториях ИСЗФ СО РАН в Норильске (70.1°N; 88.1°E) и ИКИР ДВО РАН вблизи Магадана (60°N, 150.7°E) и Хабаровска (47.6°N, 134.7°E), излучали круглосуточно с интервалом 5 минут. Два приемных пункта расположены в п. Торы вблизи Иркутска (51,8 °N, 103,1 °E) и в Норильске. Непрерывный мониторинг в режиме наклонного зондирования осуществлялся на 5 трассах: Хабаровск – Торы (2300 км), Магадан – Торы (3000 км), Норильск – Торы (2100 км), Хабаровск – Норильск (3500 км) и Магадан – Норильск (3000 км). В качестве иллюстрации на рис. 3 показаны типичные примеры возмущений Z-типа на ионограммах НЗ, вызванные прохождением СМ ПИВ через область отражения для трассы Магадан – Торы.



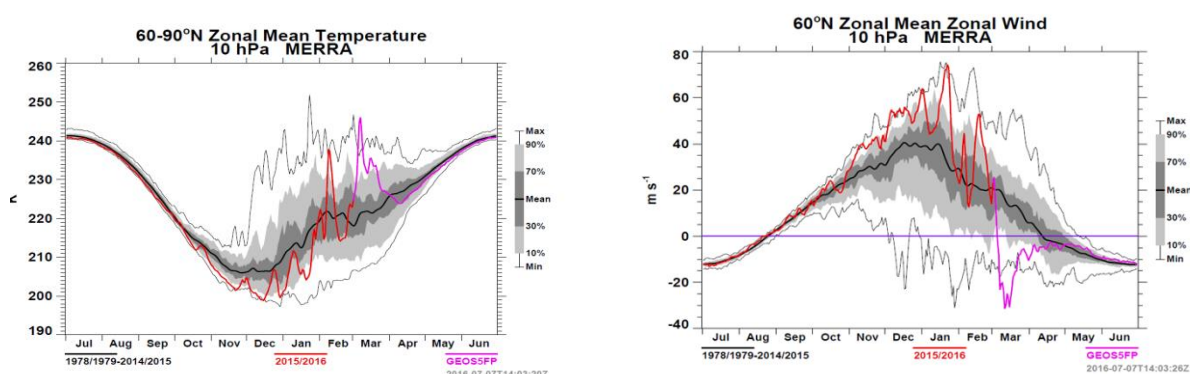
**Рис. 3. Примеры ионограмм с возмущениями Z-типа на радиотрассе Магадан - Торы с интервалом 5 минут.**

Для анализа зональных характеристик стратосферы над Северным полушарием были использованы ежедневные данные реанализа MERRA ([http://acdb-ext.gsfc.nasa.gov/Data\\_services/met/ann\\_data.html](http://acdb-ext.gsfc.nasa.gov/Data_services/met/ann_data.html)). Временные вариации стратосферной температуры в широтном диапазоне 60-90°N представлены на рис. 4 (левая панель). Правая панель на рис. 4 отражает временные вариации среднезонального ветра на широте 60°N. Черные сплошные линии – средние значения за 40-летний период,



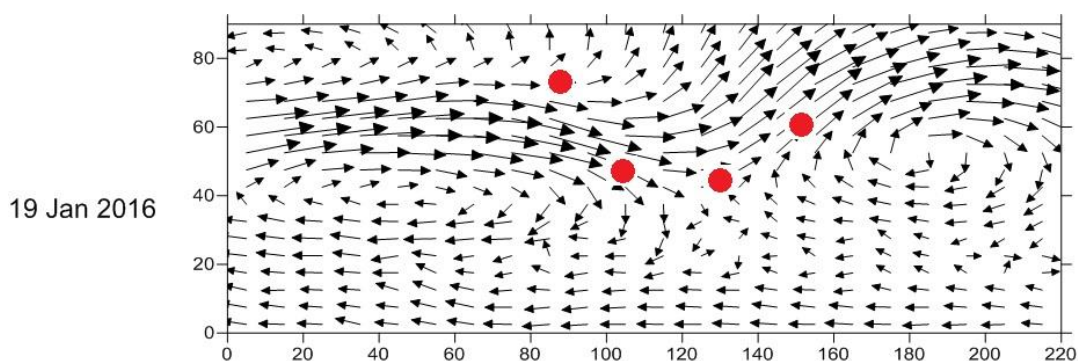
красные линии соответствуют анализируемому временному интервалу 2015-2016 гг. Использованы данные реанализа MERRA для высотного уровня 10 гПа (~32 км).

Температура средней атмосферы над исследуемым регионом анализировалась по данным вертикальных профилей температуры в стратосфере-мезосфере, полученным с помощью сканирующего сверхвысокочастотного (СВЧ) лимбового зонда MLS (Microwave Limb Sounder), установленного на борту космического аппарата Aura EOS. Использовались данные, соответствующие дневным пролетам спутника, максимально приближенным к середине каждой трассы, отмеченных на рис. 1 кружками. Температура в стратосфере (на уровнях 10 hPa (~32 км) и 1 hPa (~50 км)) в феврале - марте 2016 года характеризовалась резкими изменениями ото дня ко дню с амплитудами в десятки градусов. При этом, максимальные значения температуры на уровне 1 hPa по данным дневных измерений около средних точек радиотрасс достигали 280<sup>0</sup>К вблизи 1 февраля и 1 марта.



**Рис. 4. Зональные характеристики стратосферы на 10 гПа по данным реанализа MERRA для зимнего периода 2015-2016 гг: слева - среднезональная (60-90°N) температура; справа - среднезональный (60°N) зональный ветер.**

При анализе экспериментальных данных о нейтральном ветре на 10 гПа (~32 км) использовались данные NCEP/NCAR реанализа, доступные по ссылке: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.pressure.html>



**Рис. 5. Нейтральный ветер на 10 гПа (~32 км) 19 января 2016 г., данные NCEP/NCAR реанализа.**

На рис. 5 приведено типичное для зимних месяцев распределение скорости нейтрального ветра на 10 гПа для 19 января 2016 г. по данным NCEP/NCAR реанализа. На широте 60°N наблюдался западный ветер, что соответствует зимней картине зональной циркуляции атмосферы. Красными точками здесь отмечены координаты Норильска, п. Торы, Хабаровска и Магадана.

### Результаты, обсуждение и выводы

Геомагнитная обстановка в январе 2016 года была относительно спокойной за исключением двух периодов 1-2 и 19-21 числа, когда наблюдались умеренные магнитные бури с  $Dst$  ниже  $-80$ . В эти периоды количество зарегистрированных ПИВ уменьшалось за счет резкого падения максимальных наблюдаемых частот на трассах, пересекающих субполярные широты.

Для трассы Магадан-Иркутск вероятность регистрации ПИВ в январе 2016 г. была чрезвычайно высокой в дневные часы местного времени, хотя наблюдался существенный разброс ото дня ко дню, показанный на рис.6. вертикальными линиями для каждого часа. При этом, в ночные часы ПИВ не регистрировались, а в освещенное время суток (00 UT – 09 UT) вероятность регистрации возмущений в среднем превышала 80%, достигая в отдельные дни 100%. Длительность регистрации каждого ПИВ варьировалась от 15 до 60 минут, что свидетельствует о существенном разбросе проекций скорости ПИВ вдоль трассы или значений соответствующего характерного пространственного масштаба неоднородности.

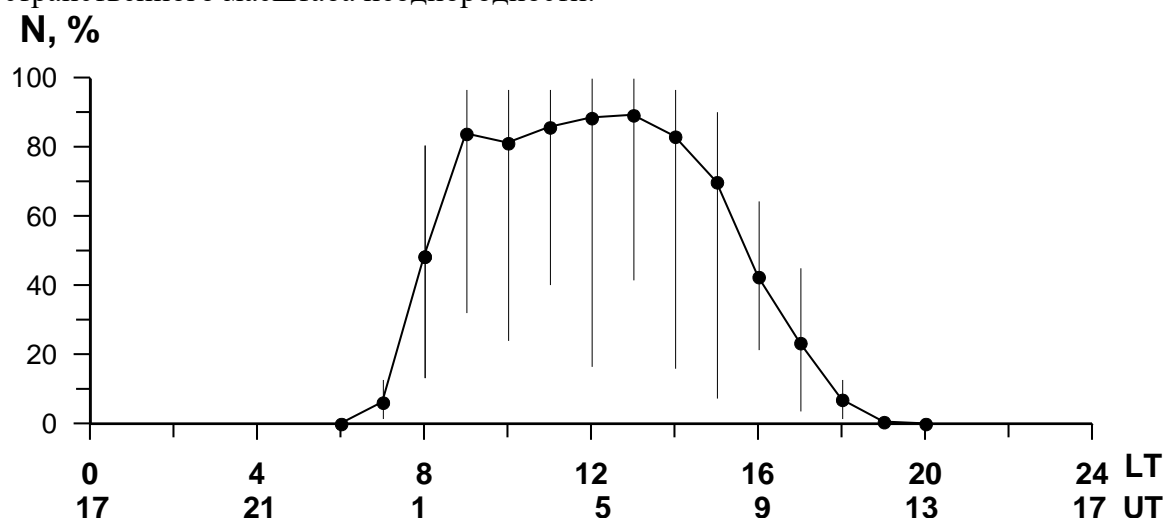


Рис. 6. Вероятность наблюдения ПИВ на трассе Магадан-Иркутск в январе 2016 г

На трассе Хабаровск-Иркутск ПИВ регистрировались круглосуточно с вероятностью в дневное время, близкой к предыдущей трассе. Но в ночные часы местного времени (для средней точки трассы) вероятность регистрации ПИВ резко уменьшалась в среднем до 20%. При этом, появились возмущения Z-типа, проходящие по ионограмме H3 от сеанса к сеансу в течение до 90 минут.

Сравнение ежедневных данных по регистрации ПИВ на трассах различной ориентации показывает следующее. На меридиональной трассе Норильск-Торы в дневные часы вероятность немного понижается по сравнению с широтными трассами (до 60-70%), но в отдельные дни также достигает 90%. Длительность регистрации отдельных ПИВ также меняется от 15 до 60 минут. На трассах Хабаровск-Норильск и Магадан-Норильск, вероятность регистрации ПИВ в дневные часы были существенно ниже, чем для трассы Магадан-Иркутск (в среднем до 30-50%), и интервал времени существенно сократился. Длительность регистрации отдельных ПИВ на этих трассах, в основном, составляла 15 – 35 минут.

Геомагнитная обстановка в феврале 2016 года характеризовалась слабой возмущенностью 2, 5 и 16-18 числа, когда наблюдались слабые магнитные бури с  $Dst$  ниже  $-40$ . По данным NCEP/NCAR реанализа, структура атмосферной циркуляции в рассматриваемом нами регионе существенно не изменилась во время внезапного

стратосферного потепления типа “minor” в начале февраля 2016 г. На трассе Магадан-Торы интервал регистрации ПИВ расширился в сторону утренних и вечерних часов, но с вероятностью менее 20%. В дневные часы вероятность регистрации ПИВ в среднем превышала 80%. Длительность регистрации отдельных возмущений на ионограммах увеличилась, составляя в основном 30-60 минут. На трассе Хабаровск-Торы вероятность регистрации ПИВ превышала 20% круглосуточно, оставаясь высокой (70-80%) в дневные часы.

Существенных изменений не наблюдалось для радиотрасс Норильск-Торы и Хабаровск-Норильск. В то же время для трассы Магадан-Норильск характерны существенные возрастания вероятности и интервала регистрации ПИВ в течение февраля месяца (рис.7).

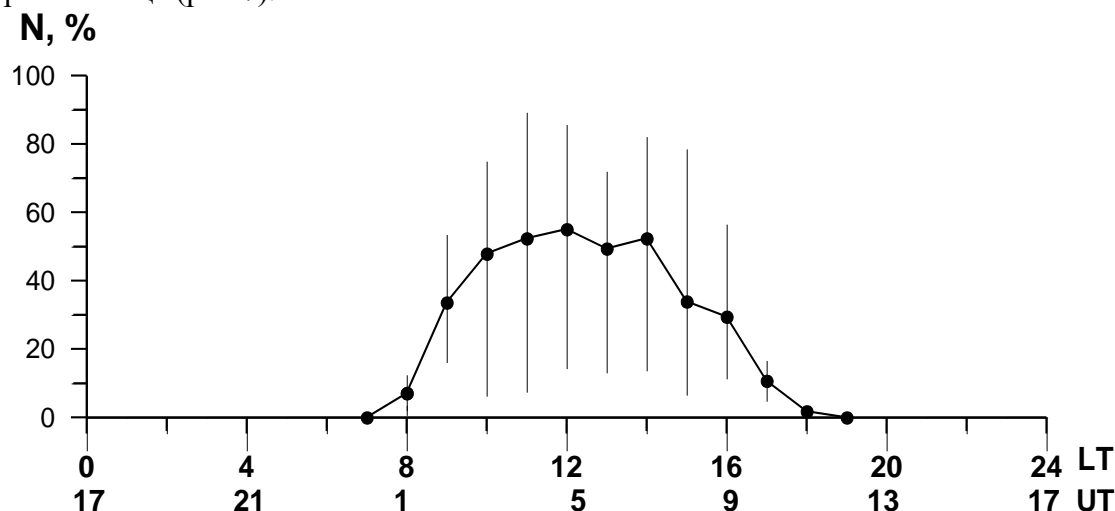


Рис. 7. Вероятность наблюдения ПИВ на трассе Магадан-Норильск в феврале 2016 г.

Финальное стратосферное потепление в начале марта 2016 г. привело к реверсу среднезонального ветра циркумполярного вихря 5 марта и ранней перестройке циркуляции средней атмосферы. На рис. 8 приведена структура нейтрального ветра на 10 гПа для 7 марта 2016 г. по данным NCEP/NCAR реанализа. На широте 60°N ветер изменил направление на восточное, что соответствует летней картине зональной циркуляции атмосферы.

Воздействие стратосферного потепления на регистрируемые СМ ПИВ в начале марта наложилось на влияние умеренной геомагнитной бури 6-10 марта.

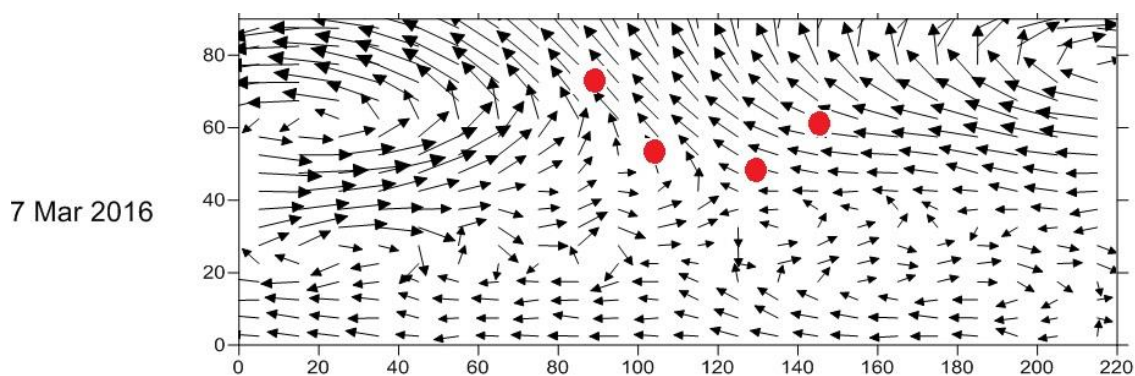


Рис. 8. Нейтральный ветер на 10 гПа (~32 км) 7 марта 2016 г., данные NCEP/NCAR реанализа.

На среднеширотных трассах наблюдались существенные вариации характерных длительностей регистрации конкретных ПИВ ото дня ко дню. В среднем вероятность регистрации ПИВ на трассе Магадан-Торы и Хабаровск-Торы снизилась на 15-30% в дневные часы. На меридиональной трассе Норильск-Торы средняя вероятность регистрации ПИВ не превышала 30%, хотя интервал регистрации ПИВ расширился до круглосуточного. На трассах Магадан-Норильск и Хабаровск-Норильск наряду с расширением интервала регистрации существенно возросла вероятность регистрации по сравнению с предыдущими месяцами. Для субполярной трассы внутри интервала устойчивого приема возмущенных ионограмм (00 – 08 UT) вероятность регистрации ионограмм с ПИВ в отдельные часы варьировалась от 20% до 100% ото дня ко дню. Наряду с малыми длительностями (15 – 25 минут) в эти дни наблюдались многочисленные ПИВ с длительностями 30 – 45 минут и более. Для трассы Хабаровск – Норильск наблюдалось резкое возрастание вероятности регистрации ПИВ в вечерние часы с 60% 29 февраля до 80% и даже 100% в интервале 07 – 10 UT с 1 по 3 марта.

Резюмируя, можно отметить следующее. Внезапное стратосферное потепление типа “minor” в начале февраля 2016 года несущественно изменило характеристики СМ ПИВ, регистрируемые на рассматриваемых трассах НЗ в азиатском регионе России. Финальное потепление в начале марта 2016 года, сопровождавшееся реверсом зонального ветра на 60°N, 10 гПа, вызвало существенные вариации характерных длительностей регистрации конкретных ПИВ на всех трассах ото дня ко дню, резкое уменьшение средней вероятности регистрации ПИВ на меридиональной трассе Норильск-Торы и среднеширотных радиотрассах Хабаровск-Торы и Магадан-Торы. В то же время на трассах Магадан-Норильск и Хабаровск-Норильск вероятность регистрации ПИВ существенно возросла по сравнению с предыдущими месяцами.

*Результаты получены на базе наблюдений, проводимых с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» [http://ckprf.ru/ckp/3056]. Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки (субсидия № 075-ГЗ/Ц3569/278) и РФФИ в рамках научного проекта № 20-05-0021.*

## **Литература**

1. Wells H.W., Watts J.M., George D.E. Detection of Rapidly Moving Ionospheric Clouds // Physical Review, vol. 69, Issue 9-10, 1946, 540-541.
2. Munro G.H. Travelling Ionospheric Disturbances in the F Region // Australian Journal of Physics, 11(1), 1958, 91-112.
3. Носке K. Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and traveling ionospheric disturbances: 1982-1995 // Ann. Geophys. 1996. V.14. N5. P.917-940.
4. Heitmann, A.J., Cervera, M.A., Gardiner-Garden, R.S., Holdsworth, D. A., MacKinnon, A.D., Reid, I.M., Ward, B.D., 2018. Observations and modelling of travelling ionospheric disturbance signature from an Australian Network of Oblique Angle-of-Arrival Sounders. Radio Sci. 53 (9), 1089–1107. <https://doi.org/10.1029/2018RS006613>.
5. Zolesi, B., Fontana, G., Perrone, L., et al. A new campaign for oblique incidence ionospheric sounding over Europe and its data application. J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 23, 854, doi: 10.1016/j.jastp.2007.02.015, 2008.
6. Pietrella, M., Perrone, L., Fontana, G., et al. Oblique-incidence ionospheric soundings over central Europe and their application for testing now casting and long term prediction models. Adv. Space Res. 43, 1611–1620, 2009.



7. Verhulst, T., Altadill, D., Mielich, J., Reinisch, B., Galkin, I., Mouzakis, A., et al. (2017). Vertical and oblique HF sounding with a network of synchronised ionosondes. *Advances in Space Research*, 60(8), 1644–1656. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.06.033>
8. Вертоградов Г.Г., Денисенко П.Ф., Вертоградова Е.Г., Урядов В.П. Мониторинг среднемасштабных перемещающихся ионосферных возмущений по результатам наклонного ЛЧМ-зондирования ионосферы // *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2008. Т.13, №5. С.35-44.
9. Vybornov, F.; Sheiner, O.; Kolchev, A.; Zykov, E.; Chernov, A.; Shumaev, V.; Pershin, A. On the Results of a Special Experiment on the Registration of Traveling Ionospheric Disturbances by a System of Synchronously Operating Chirp Ionosondes. *Atmosphere* 2022, 13, 84. <https://doi.org/10.3390/atmos13010084>
10. Medvedev A.V., Ratovsky K.G., Tolstikov M.V., Alsatkin S.S., Scherbakov A.A. Studying of the spatial-temporal structure of wavelike ionospheric disturbances on the base of Irkutsk incoherent scatter radar and Digisonde data // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2013. — Vol.105/106, — P. 350–357.
11. Sofyin, V. I. Kurkin and A. V. Podlesnyi, "Studying the impacts of various scale TIDs on ionograms of oblique incidence and near-vertical incidence sounding of the ionosphere with continuous chirp signals," 2020 7th All-Russian Microwave Conference (RMC), 2020, pp. 257-259, doi: 10.1109/RMC50626.2020.9312327
12. Cervera, M. A., and T. J. Harris (2014), Modeling ionospheric disturbance features in quasi-vertically incident ionograms using 3-D magnetoionic ray tracing and atmospheric gravity waves, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 119, 431–440, doi:10.1002/2013JA019247.
13. Reinisch, B., Galkin, I., Belehaki, A., et al. (2018). Pilot ionosonde network for identification of traveling ionospheric disturbances. *Radio Science*, 53. <https://doi.org/10.1002/2017RS006263>.
14. Medvedev A.V., Ratovsky K.G., Tolstikov M.V., Alsatkin S.S., Shcherbakov A.A. A statistical study of internal gravity wave characteristics using the combined Irkutsk Incoherent Scatter Radar and Digisonde data // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2015. V. 132. P. 13-21.
15. Medvedev A.V., Ratovsky K.G., Tolstikov M.V., Oinats A.V., Alsatkin S.S., Zhrebtsov, G.A. Relation of internal gravity wave anisotropy with neutral wind characteristics in the upper atmosphere // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2017. V. 122, № 7. P. 7567-7580. DOI: 10.1002/2017JA024103.
16. Подлесный А.В., Брынько И.Г., Куркин В.И., Березовский В.А., Киселев А.М., Петухов Е.В. Многофункциональный ЛЧМ ионозонд для мониторинга ионосферы // *Гелиогеофизические исследования*. 2013. № 2(4). С. 24–31.