

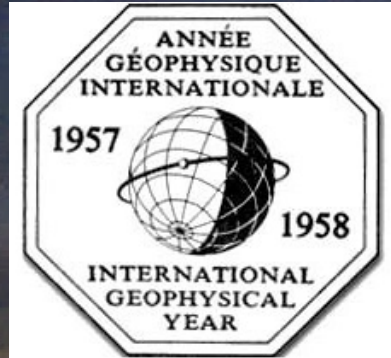
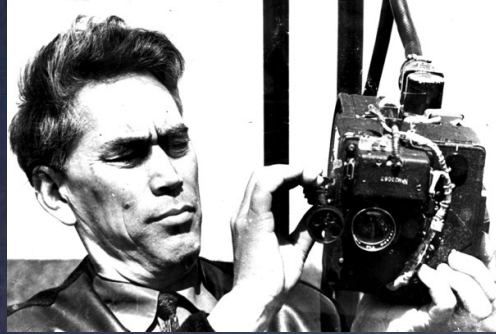
Температура мезопаузы по измерениям эмиссии ОН на меридиональной сети инфракрасных спектрографов

Колтовской И. И., Гаврильева Г. А., Аммосов П. П.

Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г.
Шафара СО РАН

Якутск, Россия

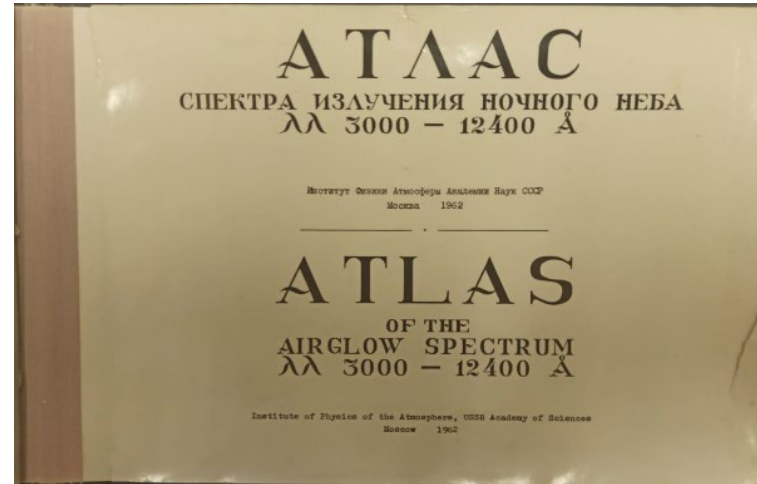
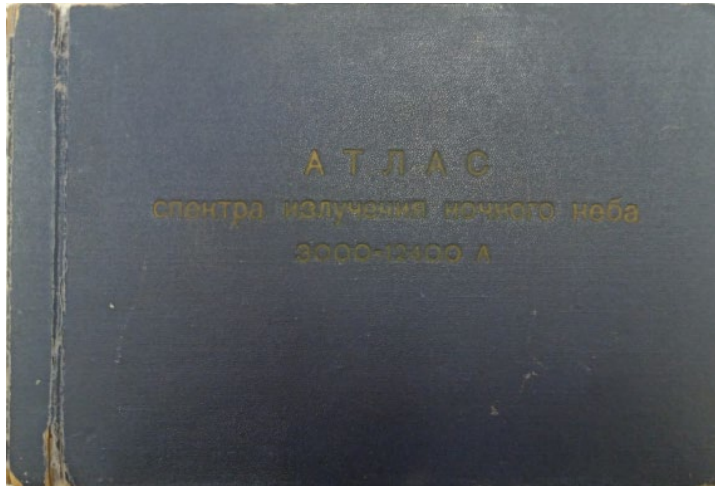
История лаборатории



- Лаборатория берет свое начало с первых наблюдений оптических явлений в верхней атмосфере в Якутии в 1957 г., начатых в связи с проведением Международного геофизического года. В это время на материковой части республики и прилегающих островах Северного Ледовитого океана была организована сеть станций патрульного наблюдения полярных сияний. Наиболее важными точками наблюдений явились г. Якутск (организаторы наблюдений В.П.Самсонов, В.И. Ярин) и бухта Тикси (Ю.А. Надубович и Е.А. Пономарев).
- Силами сотрудников лаборатории были созданы уникальные приборы – интерферометры Фабри-Перо (рук. Игнатьев В.М.), инфракрасный спектрометр (рук. Игнатьев В.М., Аммосов П.П.), сканирующие и зенитные фотометры (Иевенко И.Б.), камеры всего неба (Надубович Ю.А., Ощепков С.М.). Интенсивно работала группа автоматизации (Рук. Зарецкий Н.С.). В последние годы к ним прибавились лидар и солнечный фотометр (рук. Николашкин С.В.).

ИКФИА и ИФА объединяла общая научная программа по изучению верхней атмосферы, особенно в периоды Международного геофизического года (МГГ). Тогда в ИКФИА (Лаборатории физических проблем Якутского филиала СО АН СССР) были начаты исследования полярных сияний.

- Основными инструментами, которые использовали якутские геофизики (группа Ярина, Игнатьева), были светосильные дифракционные спектрографы серии СП (Спектрограф Полярных сияний) специально разработанные в ИФА АН СССР по руководством Красовского. (СП-48, СП-50) и внедрены на сети станций, включая Якутск и Тикси.
- Результатом работы было создание в 1962 г. Атласа спектров свечения ночного неба.



Съемки спектра свечения ночного неба, проведенные в Якутске под руководством В.И. Ярина, легли в основу «Атласа спектра излучения ночного неба 3000–12400 А» (М., Изд. ИФА, 1962, –31 С.).

Позже благодаря открытиям сотрудников ИФА АН СССР (Красовский, Шефов, Семенов) были начаты исследования волновых процессов мезосферы и нижней термосферы оптическими методами, которые успешно продолжают до сегодняшнего дня.

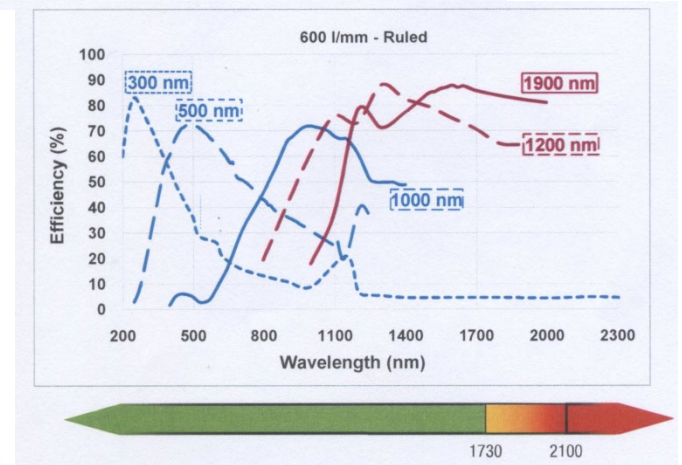
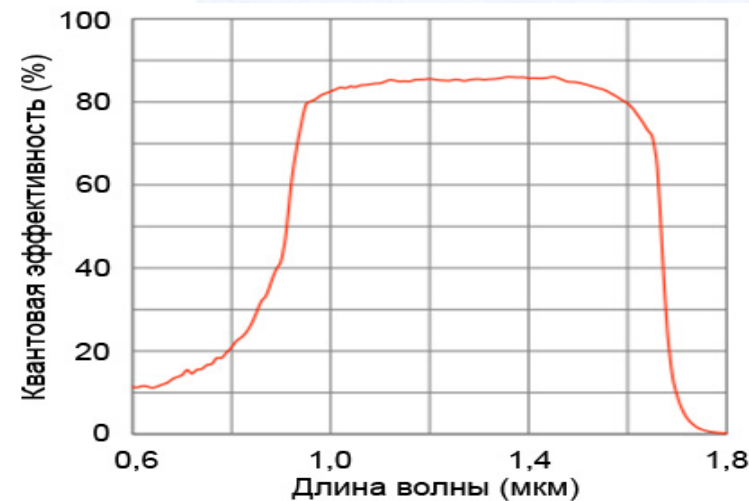
Infrared digital spectrograph the Shamrock 303i



During routine operation one spectrum is obtained every 1 min. Field of view is approximately $3^\circ \times 3^\circ$ corresponding to $6 \times 6 \text{ km}^2$ in 87 km height. The entrance slit width is set to $200 \mu\text{m}$, yielding a resolving power of $\lambda/\Delta\lambda = 1938$ corresponding to a spectral resolution of 0.8 nm at a wavelength of $\lambda = 1550 \text{ nm}$. Cooling temperature of the detector was -50°C .

Specifications Summary

Active pixels	512
Pixel size (W x H)	$25 \times 500 \mu\text{m}$
Pixel well depth (typical)	
High Dynamic Range mode	170 Me^-
High Sensitivity mode	5 Me^-
Maximum cooling ^{*1}	-90°C
Maximum spectra per sec	193
Read noise (typical)	580 e^-
Dark current (typical)	$11.7 \text{ ke}^-/\text{pixel}/\text{sec}$
Minimum exposure time	$1.4 \mu\text{s}$

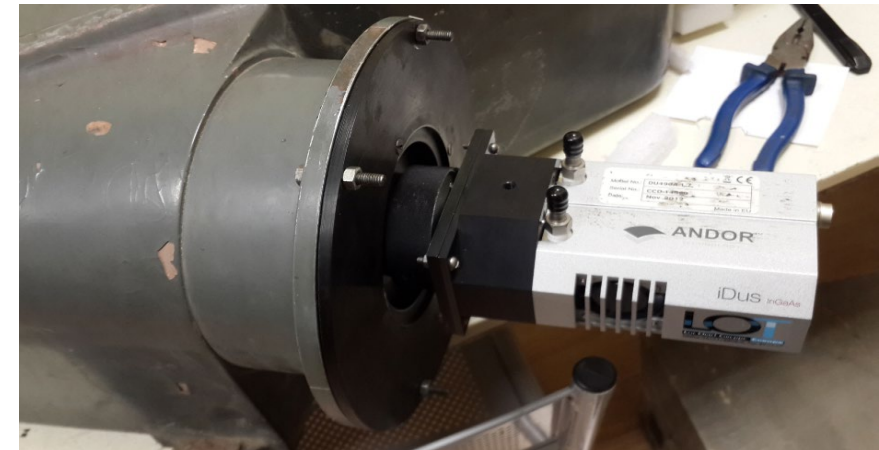
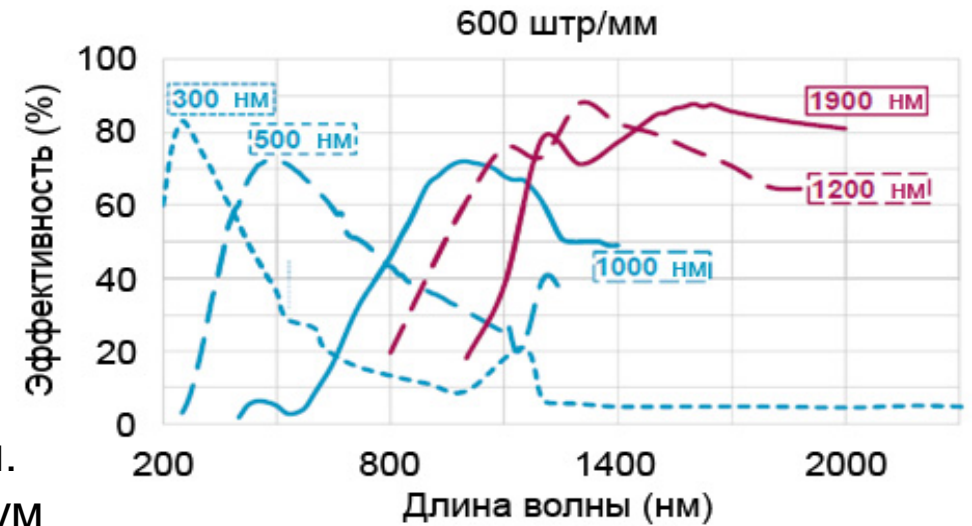


Shamrock SR 303i is equipped with a thermoelectrically cooled 512 pixel InGaAs-photodiode array and monochromator with 303 mm focal length both manufactured by ANDOR Technology. Shamrock SR 303i built on the principle of Czerny-Turner.

ANDOR DU490A-1.7



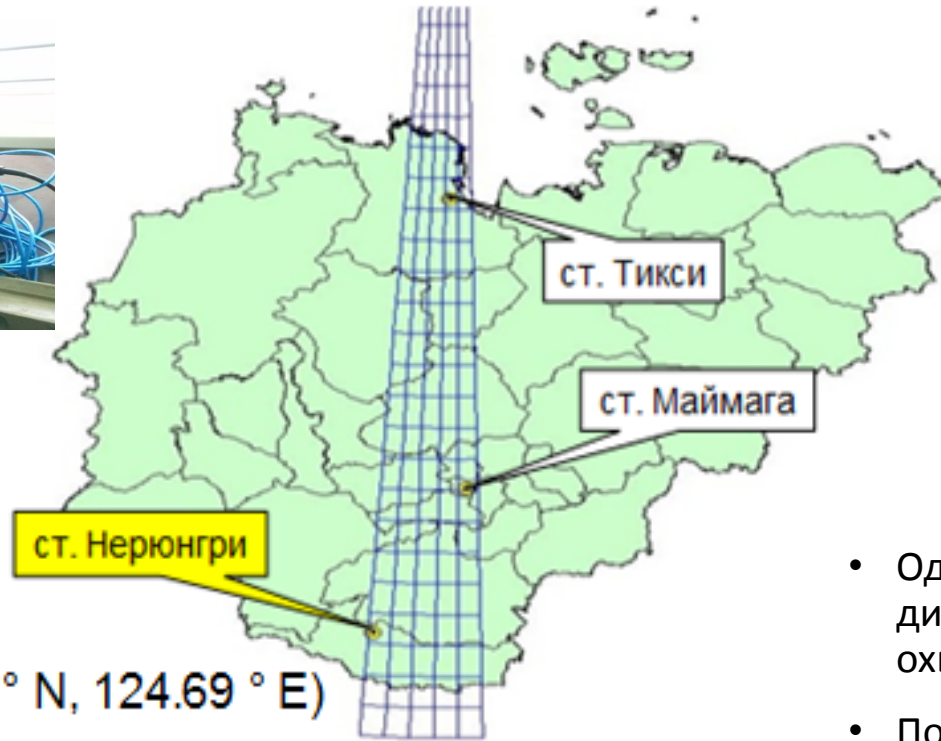
Рабочий диапазон лежит в пределах от 900 нм до 1650 нм. $T(\max) -90^{\circ}\text{C}$. $Q_e > 85\%$. $T(\min) 1,4 \text{ мс}$. Стандартный шум считывания 580 e^{-1} . Уровень темнового шума $10,1 \text{ Ke}^{-1} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{пиксель}^{-1}$. Чувствительность $\sim 90 \text{ e}^{-1}/\text{count}$.



- In order to study variations the temperature of the mesopause and wave processes with the latitude, it was decided to create a meridional network consisting of infrared spectrographs.

Расположение станций

Маймага (63.04° N, 129.51° E) и Тикси (71.58° N, 128.77° E)



С 2018 г.

(56.66 ° N, 124.69 ° E)



Тикси. С 2015 г.

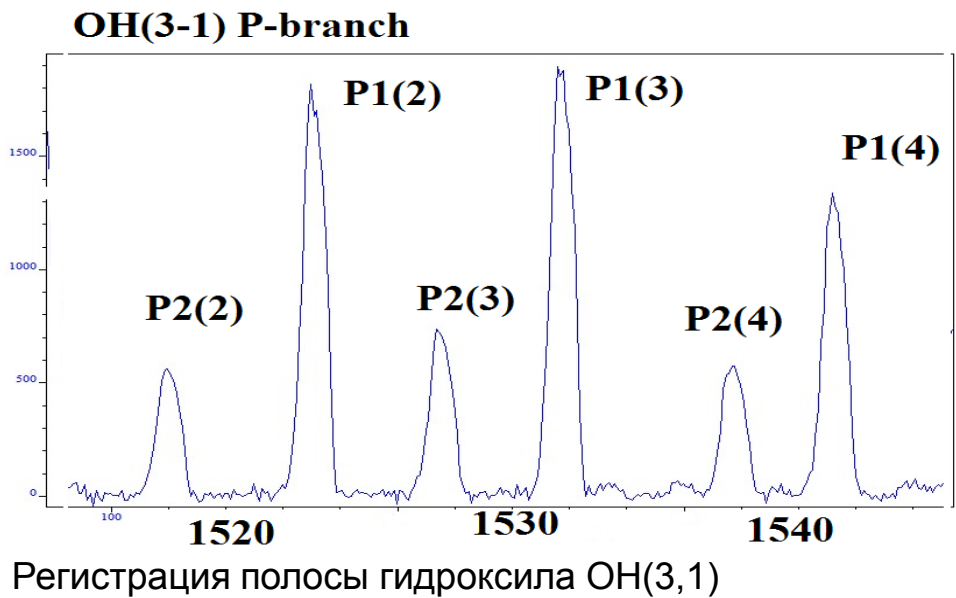
Цели и задачи:

- Одновременные измерения термического и динамического режима мезопаузы, которая охватывает область от средних до полярных широт.
- Получить временные ряды, чтобы идентифицировать и определить величину флуктуаций как планетарных волн по температуре мезопаузы, используя пространственную разнесенность станций, так и приливных и внутренних гравитационных волн на каждой из станций.
Проследить сезонную и межгодовую изменчивость их амплитуд и периодов.



Маймага. С 2013 г.

Определение вращательной температуры:



Случайные ошибки измерения температуры лежат в пределах 2–4 К в зависимости от уровня отношения сигнал/шум.

Метод оценки молекулярных эмиссий основан на подгонке модельных спектров, построенных с учетом аппаратной функции прибора для различных, заранее заданных температур, к реально измеренному спектру

$$S(\lambda,T)=const\cdot\lambda^{-4}\cdot i(J')\cdot exp\left(-\frac{F(J')\cdot h\cdot c}{k\cdot T}\right),$$

где $i(J')$ – фактор интенсивности, $F(J')$ – энергия возбуждения, J' – вращательное квантовое число верхнего исходного уровня, T – вращательная температура, λ – длина волны, k – постоянная Больцмана, h – постоянная Планка.

$$S'(i)=\sum_{j=1}^mS(i,T)\cdot z(i-j)$$

где $z(i)$ – передаточная функция спектрографа, i – номер пикселя, m – ширина передаточной функции.

$$S''(i)=A+B\cdot i+C\cdot S'(i)$$

где $A+B\cdot i$ – непрерывная составляющая спектра, C – коэффициент подгонки.

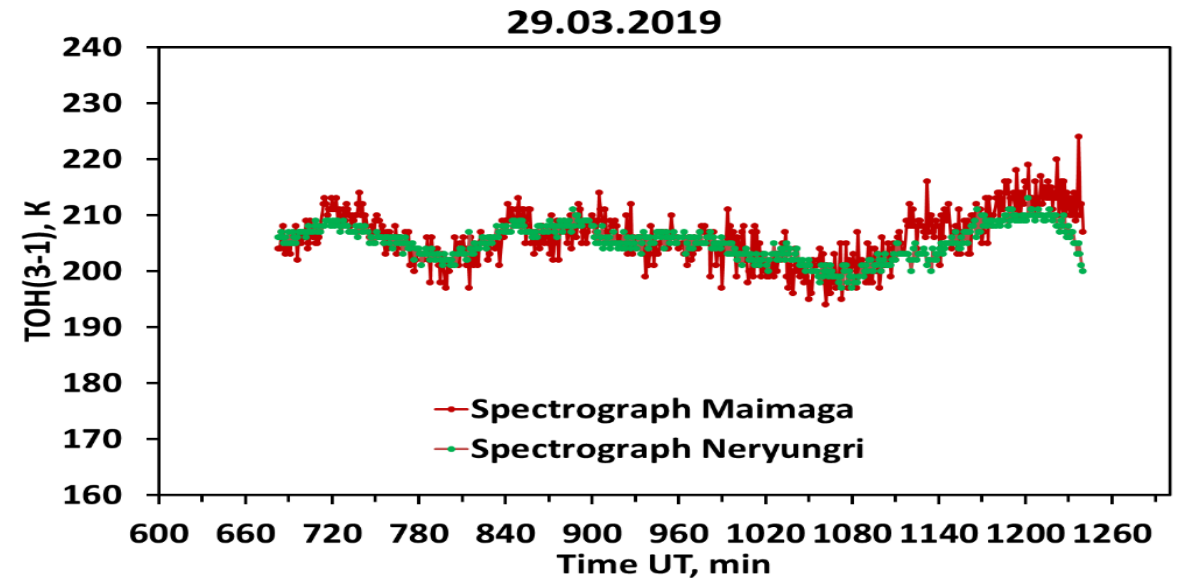
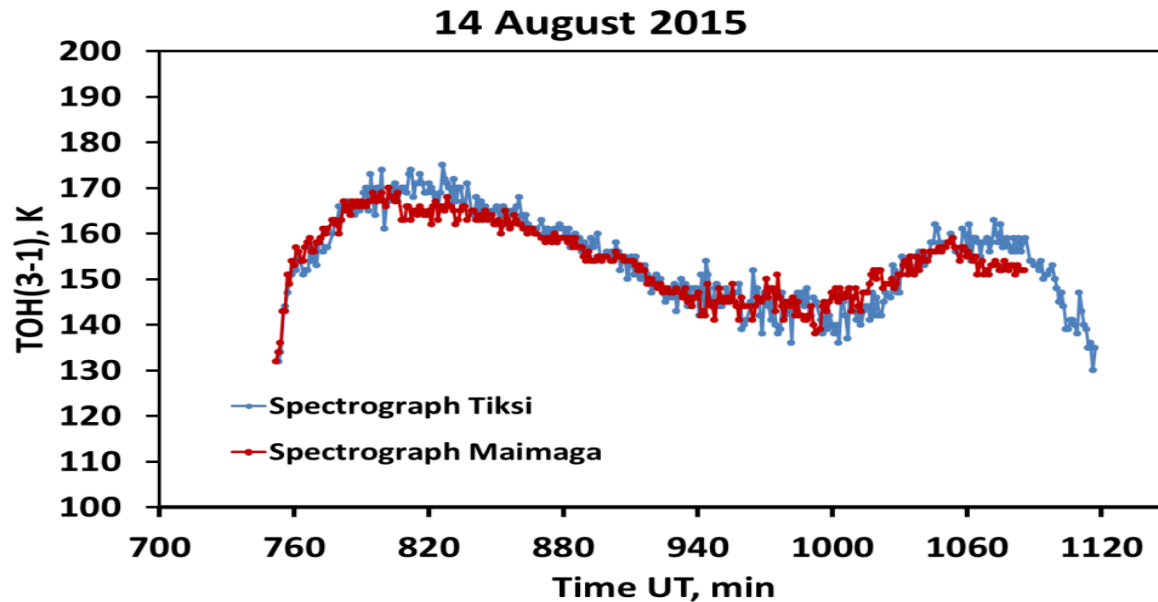
$$minF(T)=\sum_{i=k1}^{k2}[(E(i)-S''(i,T))]^2$$

где $F(T)$ – отклонение синтетического контура от реальных значений, $E(i)$ – реальный спектр, $k1, k2$ – область подгонки

***Cross-calibration of spectrographs installed in
Maimaga (63 ° N, 129.5 ° E), Tiksi (71.5 ° N, 129 ° E)
and Neryungri (56.39° N, 124.43° E)***

Left panel -An example of comparing the rotational temperatures OH (3-1) obtained by two independent spectrographs at the Maimaga station.

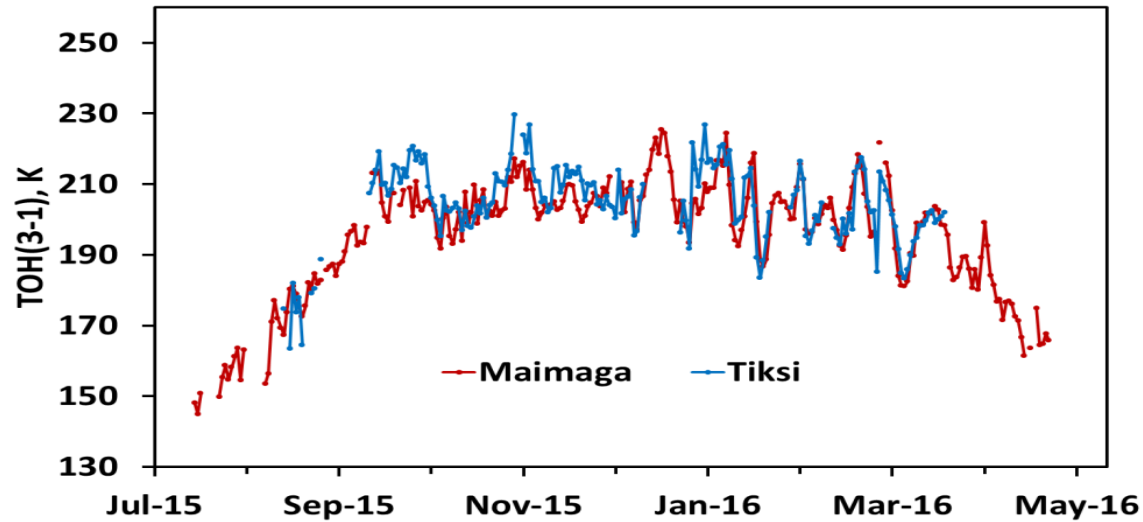
Right panel – an example of comparing the rotational temperatures OH (3-1) obtained by two independent spectrographs at the Neryungri station.



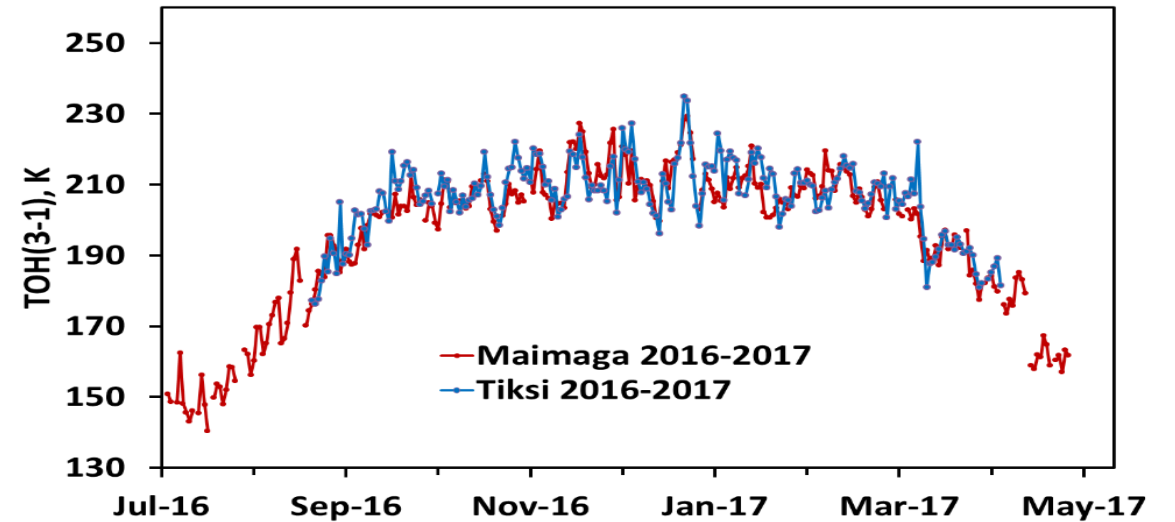
Cross-calibration was carried out in the Maimaga from August, 5 to August, 15, 2015. Both instruments were directed approximately to the same part of the sky and recorded OH (3-1) radiation simultaneously. The spectrograph Shamrock, who worked in Maimaga, was moved to Neryungri to calibrate the MDR-12 spectrograph. Cross-calibration was carried out in the Neryungri from March, 29 to April, 3, 2019. Both instruments were directed approximately to the same part of the sky and recorded OH (3-1) radiation simultaneously.

Comparison of nighty averaged TOH(3-1) obtained at the stations Tiksi and Maimaga

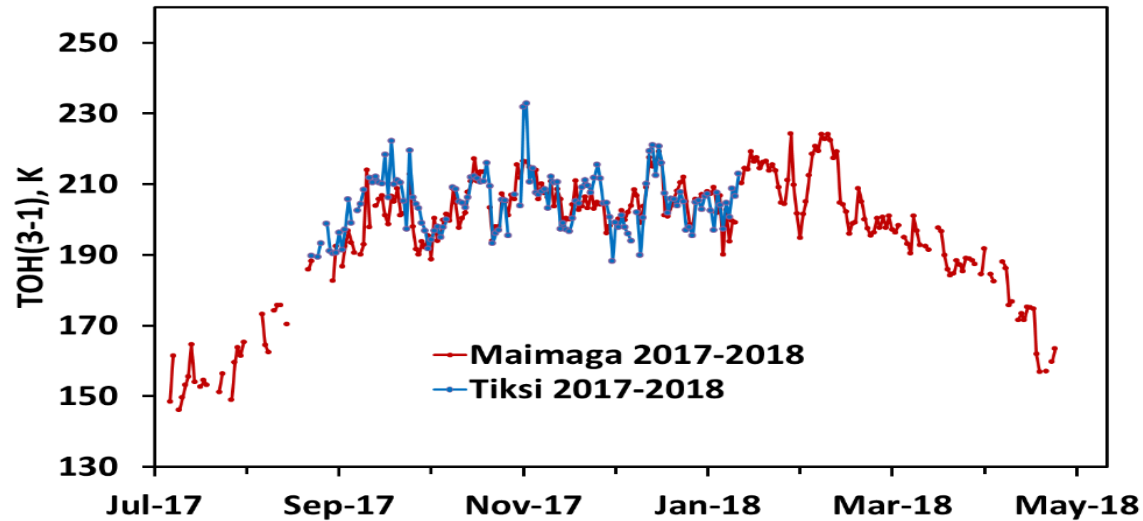
2015-2016



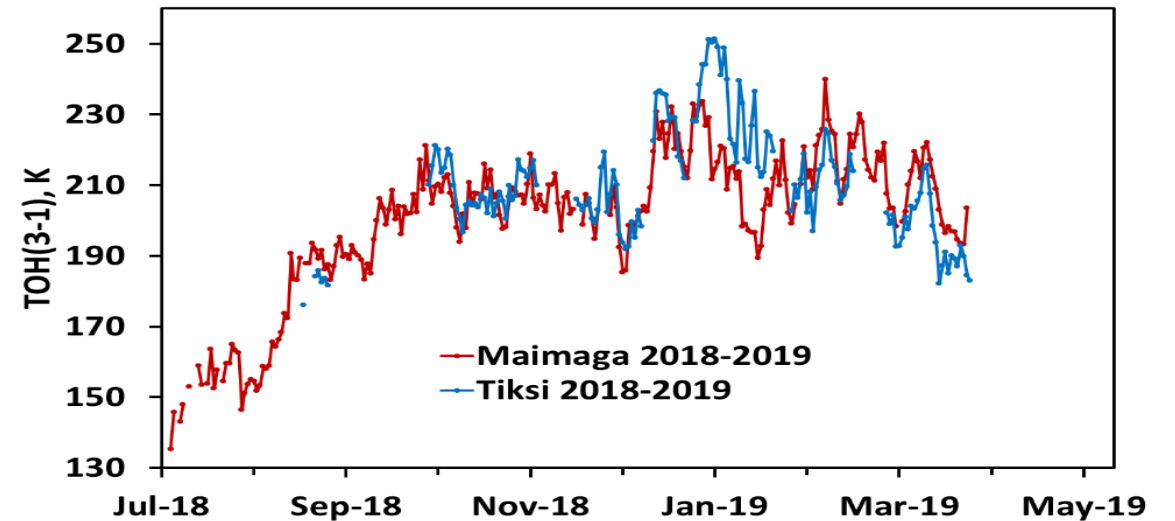
2016-2017



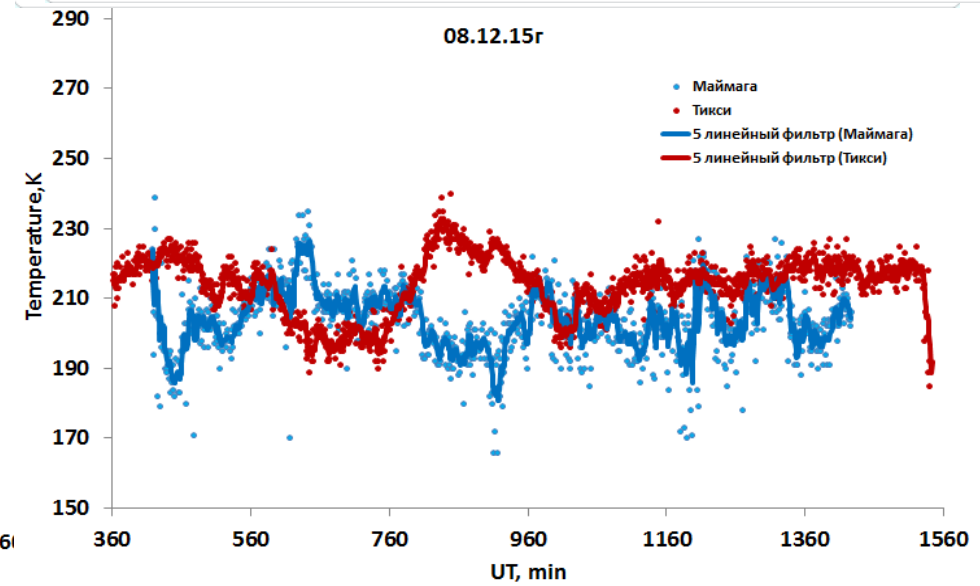
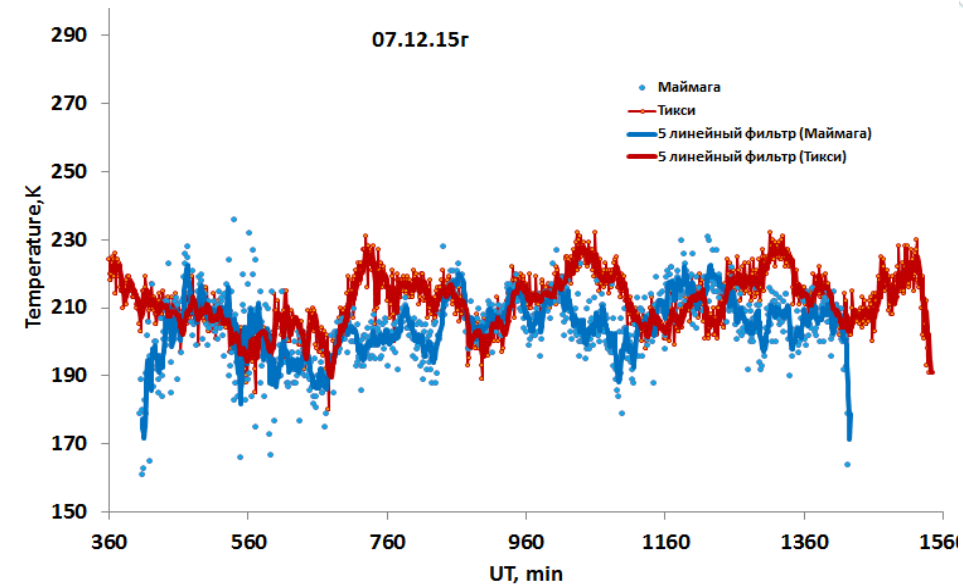
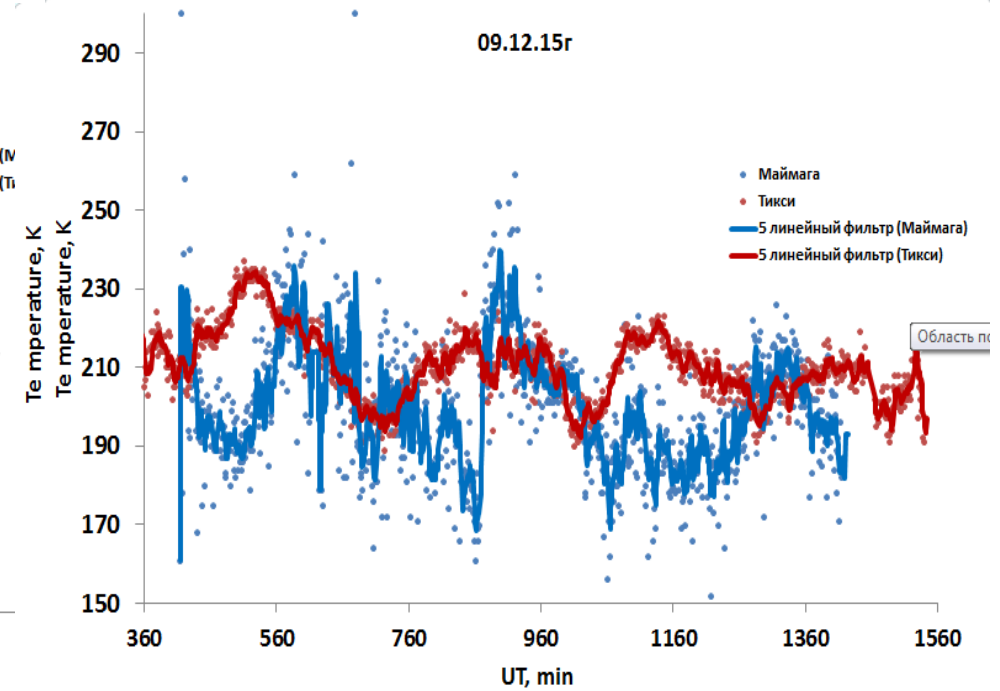
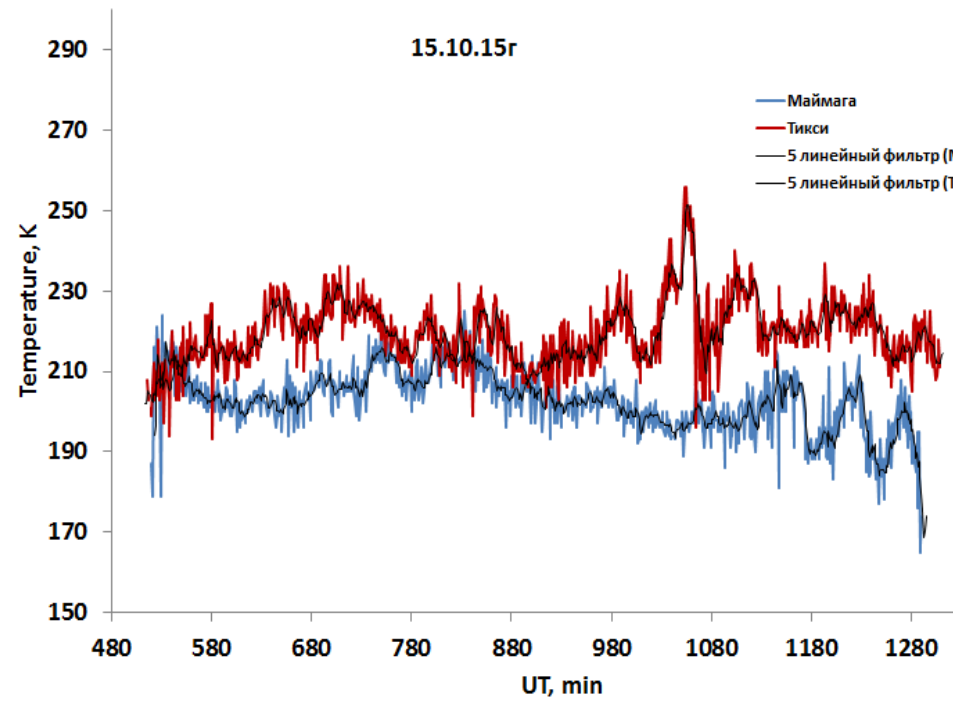
2017-2018

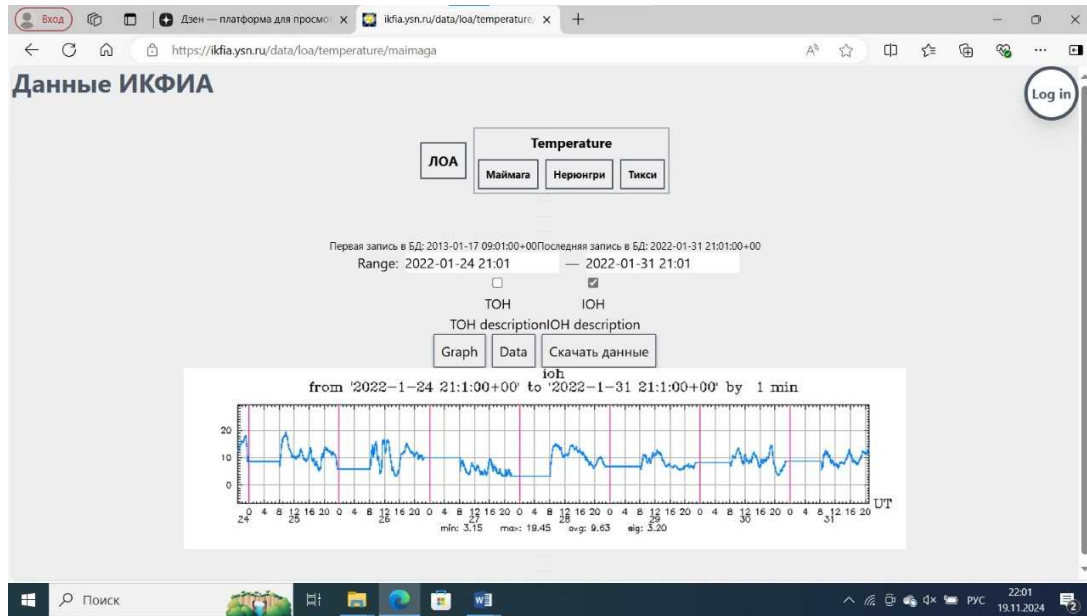


2018-2019



Сравнение вращательных температур полос гидроксила OH(3,1) полученных из двух разных оптических станций (ночной ход)





База данных <https://ikfia.ysn.ru/data/loa/temperature/> содержит название станции; дата-время; вращательная температура ОН(3-1), относительная интенсивность ОН(3-1); . Разрешение 1 минута.

База содержит данные, полученные с 17 января 2013 года по настоящее время.

Данные ИКФИА

ЛОА

Temperature

Маймага Нерюнгри Тикси

Первая запись в БД: 2013-01-17 09:01:00+00 Последняя запись в БД: 2022-01-31 21:01:00+00
Range: 2022-01-24 21:01 — 2022-01-31 21:01

☒ ТОН ☐ ИОН

TON description ION description

Graph Data Скачать данные

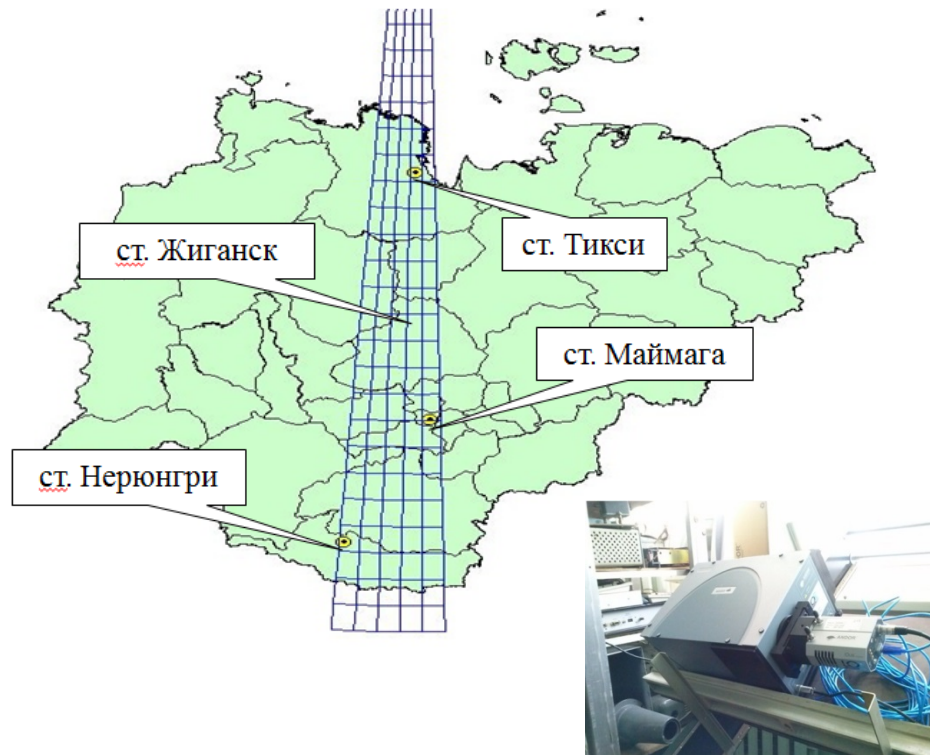
dt	toh
2022-01-24 21:01:00+00	212.00
2022-01-24 21:02:00+00	208.00
2022-01-24 21:03:00+00	211.00
2022-01-24 21:04:00+00	212.00
2022-01-24 21:05:00+00	209.00
2022-01-24 21:06:00+00	212.00
2022-01-24 21:07:00+00	215.00
2022-01-24 21:08:00+00	213.00
2022-01-24 21:09:00+00	212.00

База данных:

П.П. Аммосов, Г.А. Гаврильева, И.И. Колтовской
«Меридиональная оптическая сеть в Якутии» (“Meridional optic network in Yakutia (MONY)”).

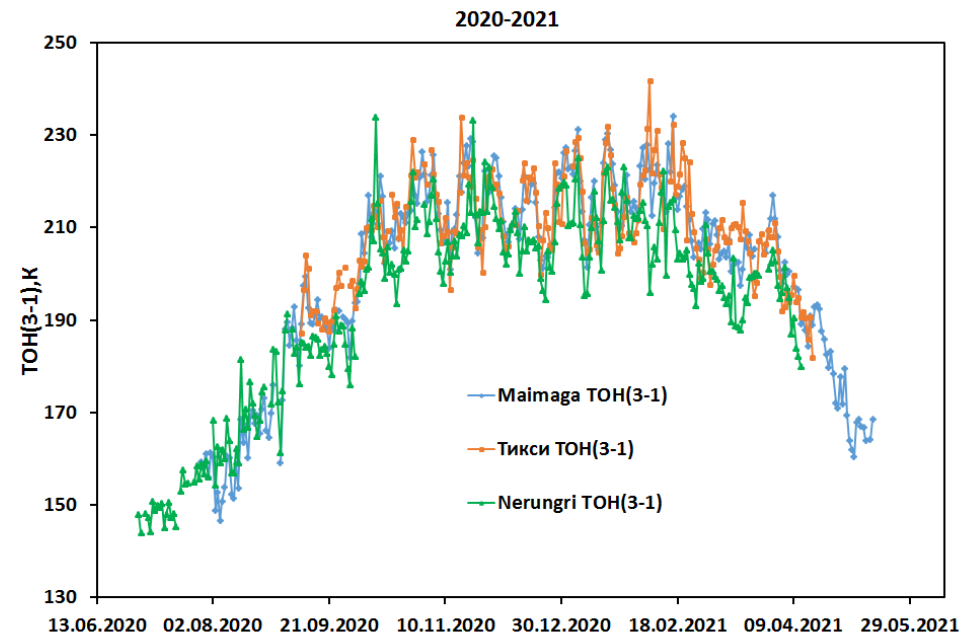
Исследование температурного, динамического режима и состава средней и верхней атмосферы Восточной Сибири.

Расположение станций



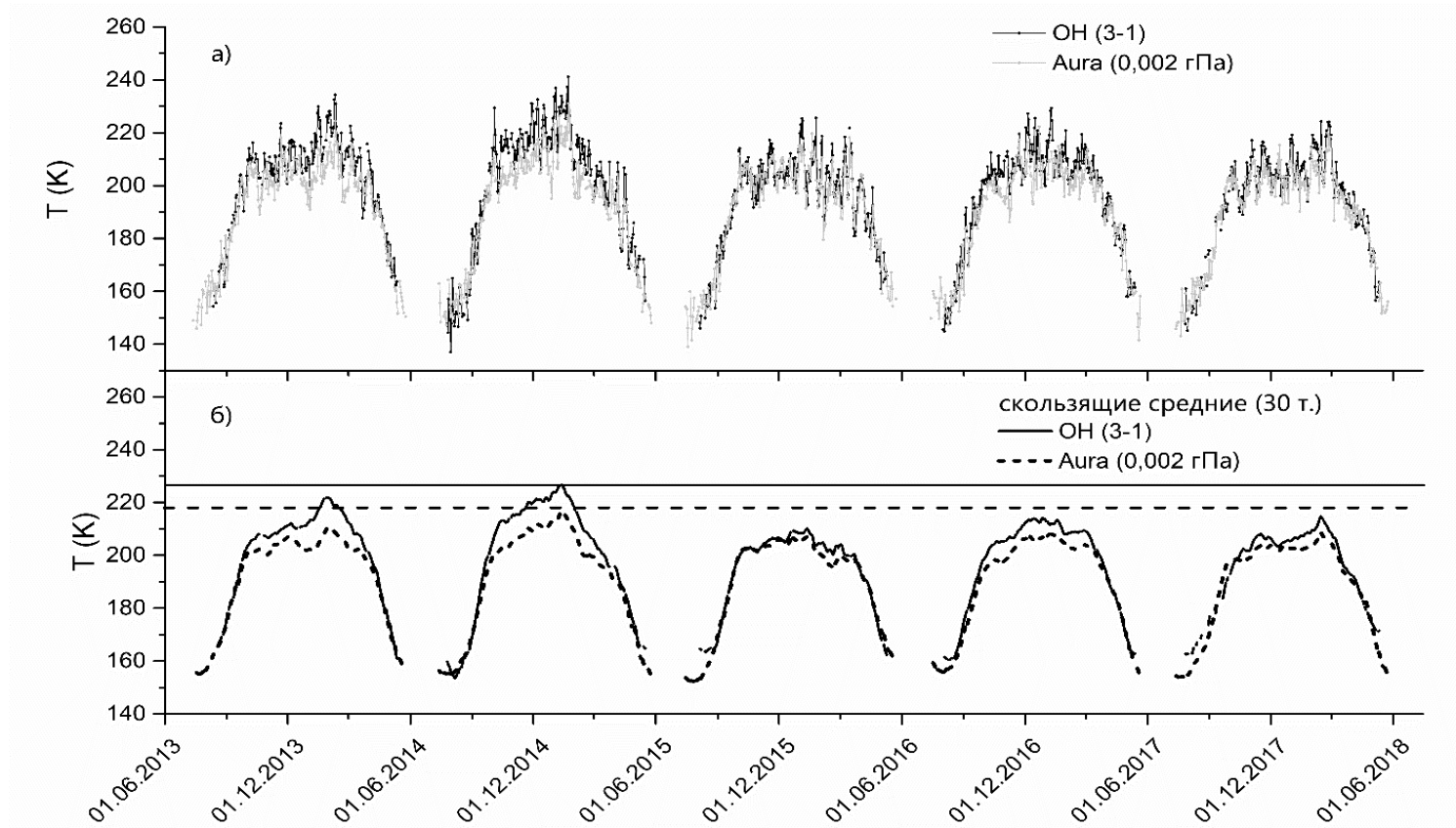
- На базе Shamrock-Andor, МДР-2 и МДР-12.
- Данные снятые за ночь каждое утро автоматически передаются на сервер института.
- Создана единая база данных.
- Разработаны пакеты программ для управления, обработки и анализа данных.

- **Спектрограф инфракрасный Shamrock-Andor** используется для регистрации волновых процессов в области мезопаузы (на высоте ~87 км) по вращательной температуре излучения гидроксила в свечении ночного неба. Прибор состоит из монохроматора Shamrock SR303i и регистратора на базе ПЗС линейки Andor InGaAs DU490A.
- Из четырех аналогичных спектрографов создана **меридиональная сеть (MONY - Mesopause Observation Network in Yakutia)** для исследования широтных особенностей волновых процессов. Автоматизированные приборы размещены в бухте Тикси, Жиганске, Маймаге и Нерюнгри.
- С 2013 г ведется непрерывное сезонное наблюдение на ст. Маймага
- С 2015 г – ст. Тикси
- С 2018 г – ст. Нерюнгри
- С 2022 г – ст. Жиганск



Some results

Сравнение со спутниковым данным

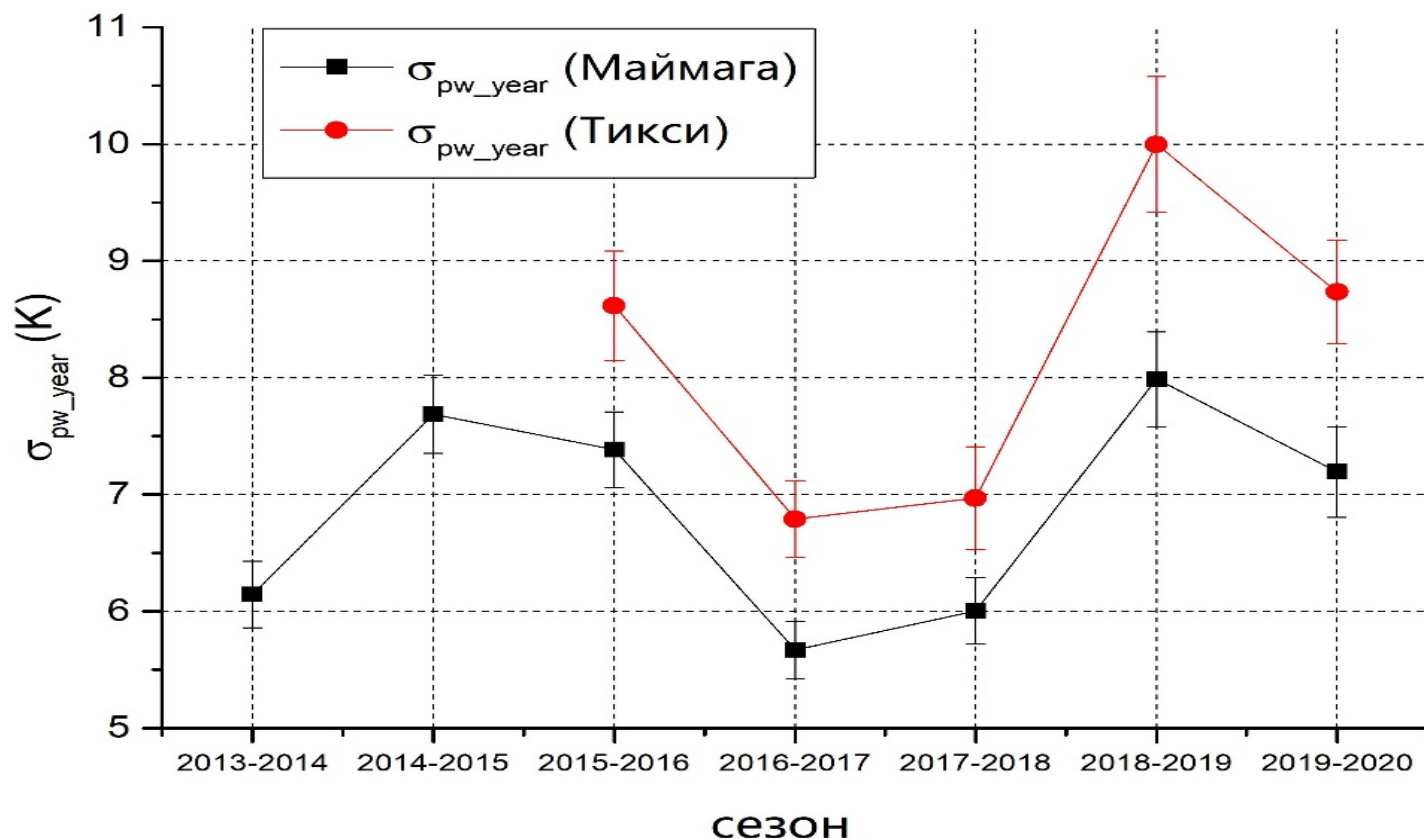


a) Average rotational temperatures OH (3-1) (black dots) and temperatures (gray dots) isolated from Aura (MLS) temperature measurements at 0.002 gPa above the Maymaga station, b) smoothed temperature values for 2013-2018.

A comparative analysis of the average rotational temperatures of hydroxyl radiation in the mesopause region in the glow of the night sky (TOH (3-1)) measured at the Maymaga station with temperatures obtained from the Aura (MLS) (TAura) satellite and selected background temperatures (Tbg) was carried out.

Sivtseva V.I., Ammosov P.P., Gavrilyeva G.A., Koltovskoi I.I. Atmospheric Temperature from the Aura (MLS) Satellite and OH (3-1) Measurements in Maimaga // Atmospheric and Oceanic Optics, Pleiades Publishing, Ltd., 2021, Vol. 34, No. 5, pp. 417–421. ISSN 1024-8560 DOI: 10.1134/S1024856021050213.

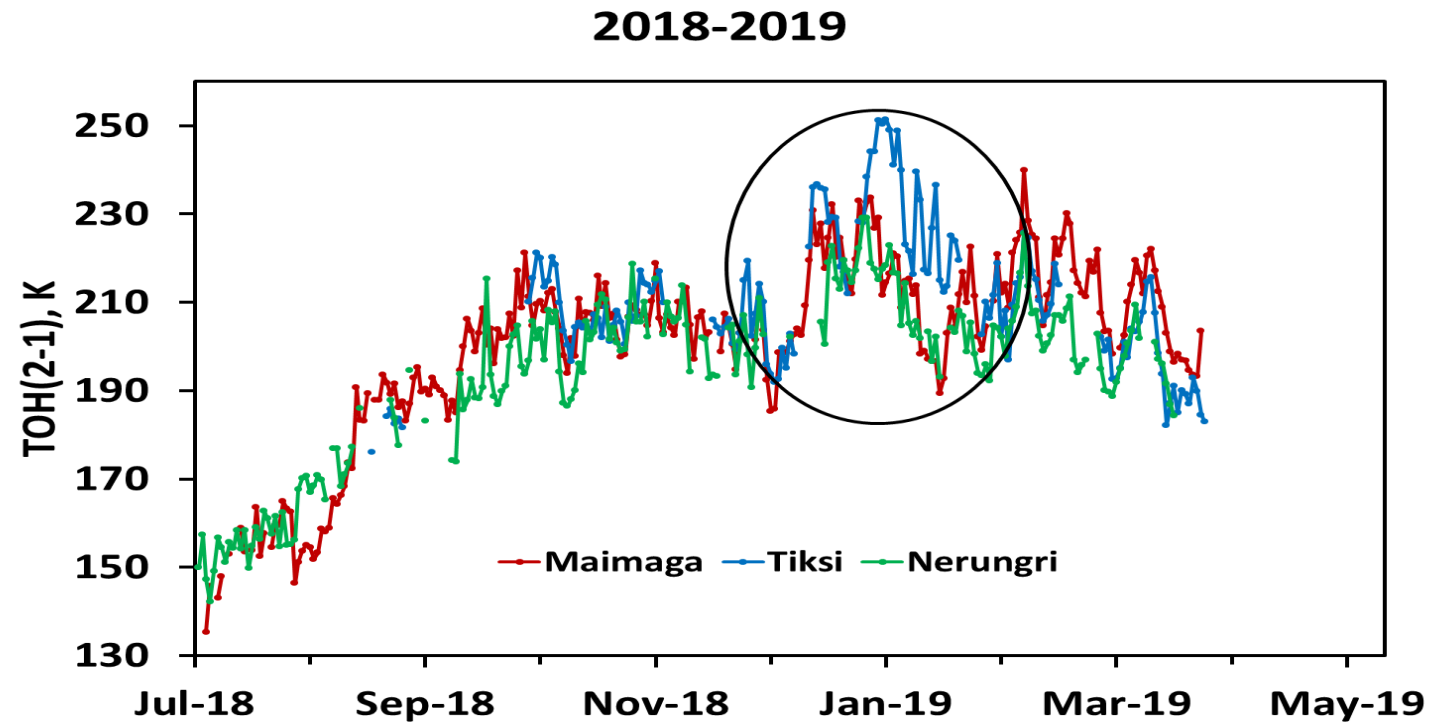
Annual activity of planetary waves σ_{pw_year} for st. Maimaga and Tiksi (2013-2020)



The behavior of the parameter σ_{pw} , reflecting the activity of planetary waves in winter, from 2015 to 2020 at the stations of Maimaga and Tiksi showed that the fluctuations of σ_{pw} at both stations occur almost synchronously, and its value at st. Tiksi exceeds the value on the Maymaga station by an average of 1-2 K.

Sivtseva V.I., Ammosov P.P., Gavrilieva G.A., Ammosova A.M., Koltovskoi I.I. Wave activity of the mesosphere in the planetary wave range according to OH (3-1) emission observations at Maimaga and Tiksi stations for 2015–2020. Solar-Terrestrial Physics. 2022. Vol. 8. Iss. 4. P. 89–94. DOI: 10.12737/stp-84202209

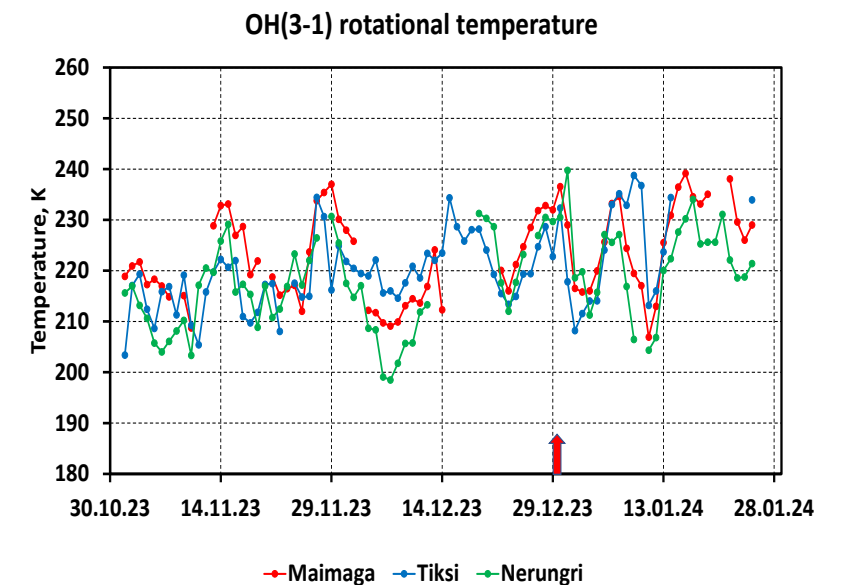
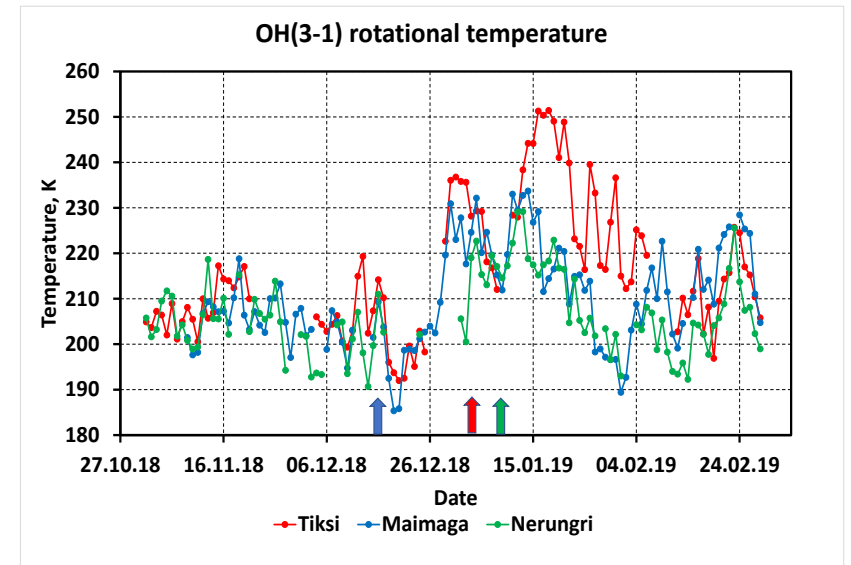
Measurement data on the meridional network of stations in the season 2018-2019.

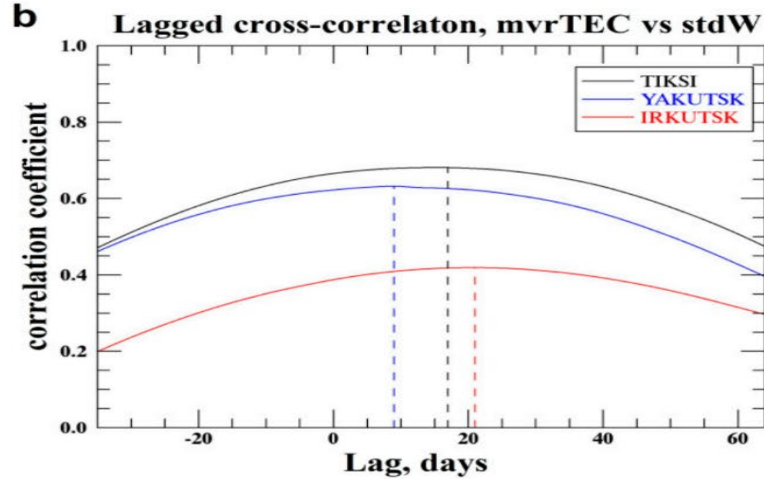
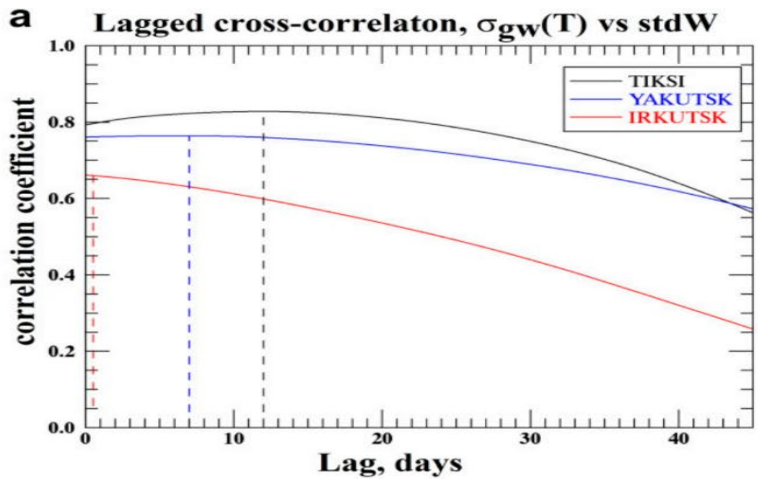
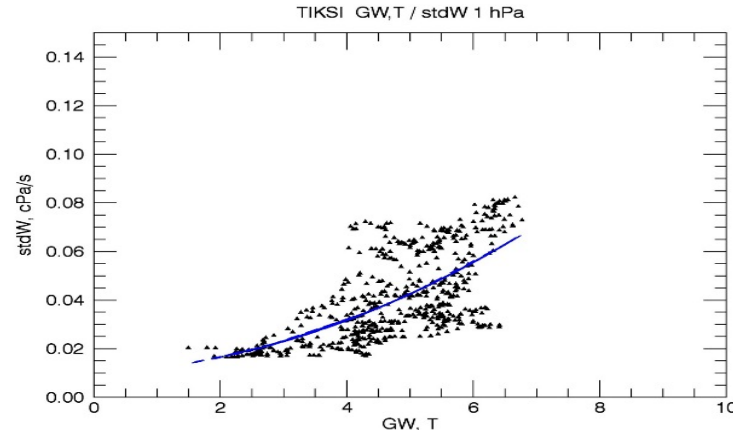
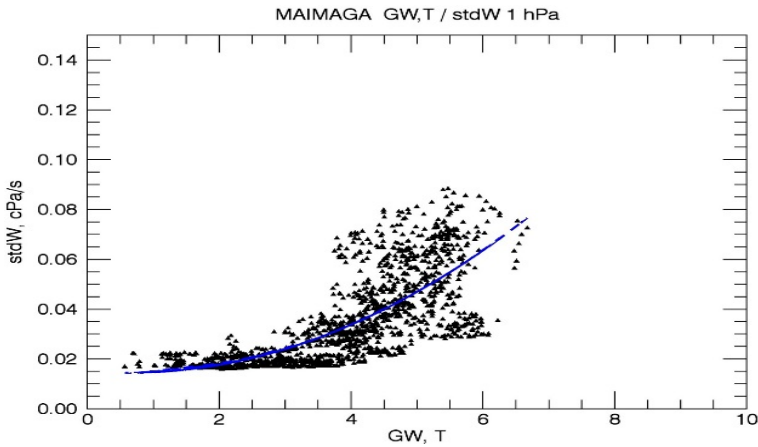


Oval marked days when the temperature at the height of the hydroxyl emission above the Arctic station of Tiksi is higher than the temperature at the Maimaga subarctic station and the mid-latitude station Neryungri. The temperature measured in Tiksi is up to 250 K

Измерение температуры атмосферы на высоте излучения ОН при ВСП

- Представлен отклик температуры на высоте излучающего слоя ОН(3-1) для двух разных случаев стратосферного потепления.
- Измерения велись на Северо-восточной меридиональной сети оптических станций, которая включает полярную (Тикси 71.5°N, 129°E), субполярную (Маймага 63°N, 129.5°E) и среднеширотную (Нерюнгри 56.39°N, 124.43°E) станции. Температура, измеренная наземным прибором, сопоставима с температурой нейтральной атмосферы, полученной радиометрами MLS/Aura и SABER/TIMED.
- 1. Необычно крупное событие внезапного стратосферного потепления (ВСП) (декабрь 2018 - февраль 2019). С началом ВСП рост температуры стратопauзы, снижение ее высоты происходит на трех станциях одновременно вследствие смещения полярного вихря к Сибири. Сеть находится внутри полярного вихря. В начале января происходит расщепление полярного вихря и охлаждение стратосферы. К 10 января атмосфера с 20 до 90 км становится почти изотермической. Начиная с этого дня над Тикси и Маймагой формируется очень высокая (80 - 70 км) стратопauза, которая до конца февраля спускается до значений начала ноября 2018 г. С формированием поднятой до 80 км стратопauзы над Тикси, начинается резкое снижение высоты излучения ОН и рост температуры внутри слоя. Минимум высоты (78 км) и максимум ТОН до 250 К регистрируется 18 января 2019 г.
- 2. Потепление в январе 2024 года не обнаруживает столь кардинальных изменений в мезосфере. На всех трех станциях развитие ВСП проходит примерно одинаково. Поднятой стратопauзы не наблюдается.





На основе данных полного электронного содержания ионосферы (ТЕС) по измерениям вариаций сигналов ГНСС и измерений автоматическими цифровыми инфракрасными спектрографами интенсивности эмиссии гидроксила на высоте мезопаузы проведен совместный анализ уровня возмущенности, связанной с активностью ВГВ для трех станций наблюдений (Тикси, Маймага, Нерюнгри). Обнаружены схожие, выраженные регулярные сезонные вариации возмущенности в мезосфере и ионосфере. Выявлен высокий уровень корреляции между значениями возмущенности в мезосфере/ионосфере и индексом стратосферной возмущенности (ERA-Interim)

Yasyukevich A. S., Medvedeva I. V., Sivtseva V. I., Chernigovskaya M.A., Ammosov P.P., Gavril'yeva G. A. Strong Interrelation between the Short-Term Variability in the Ionosphere, Upper Mesosphere, and Winter Polar Stratosphere // Remote Sensing. 2020. Vol. 12. № 10. P. 1588

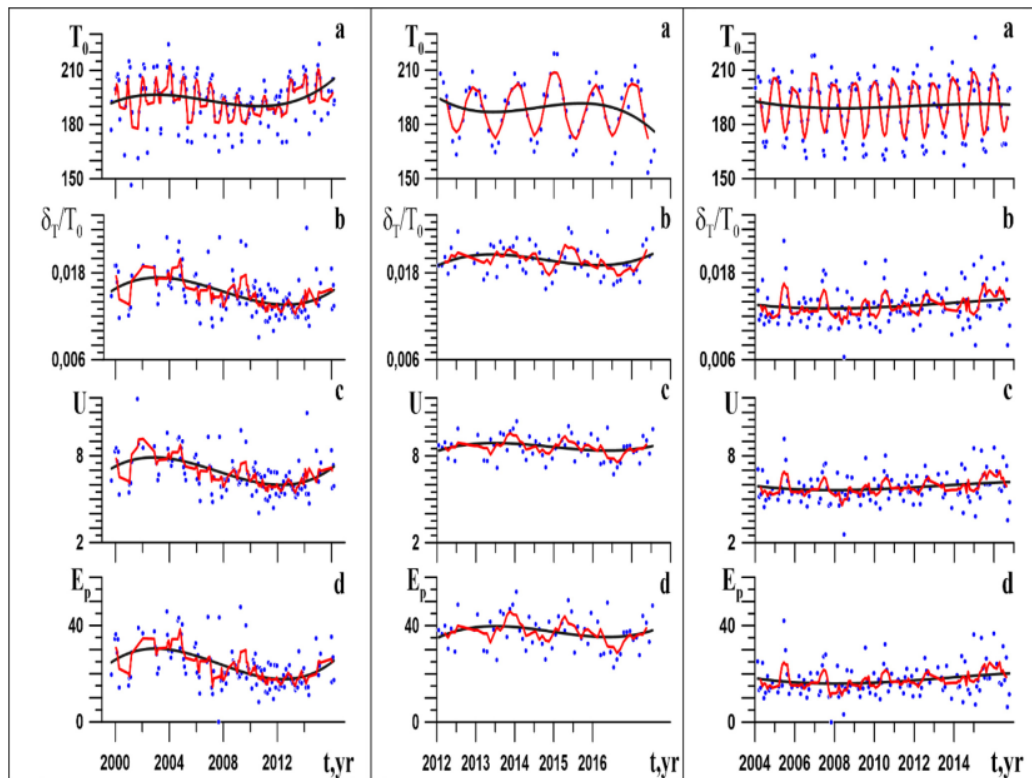


Fig. 8. Monthly-mean OH rotational temperatures in K (a), the temperature relative standard deviation (b), the standard deviation of IGW horizontal velocity in ms^{-1} (c), and the specific IGW potential energy in J kg^{-1} (d) for Maymaga (left), Tory (middle) and Zvenigorod (right) for the filter of Eq. (1) with $\Delta t = 1$ h after the uncorrelated noise correction. The smoother and more variable curves match to a cubic polynomial and 7-month running averaging, respectively.

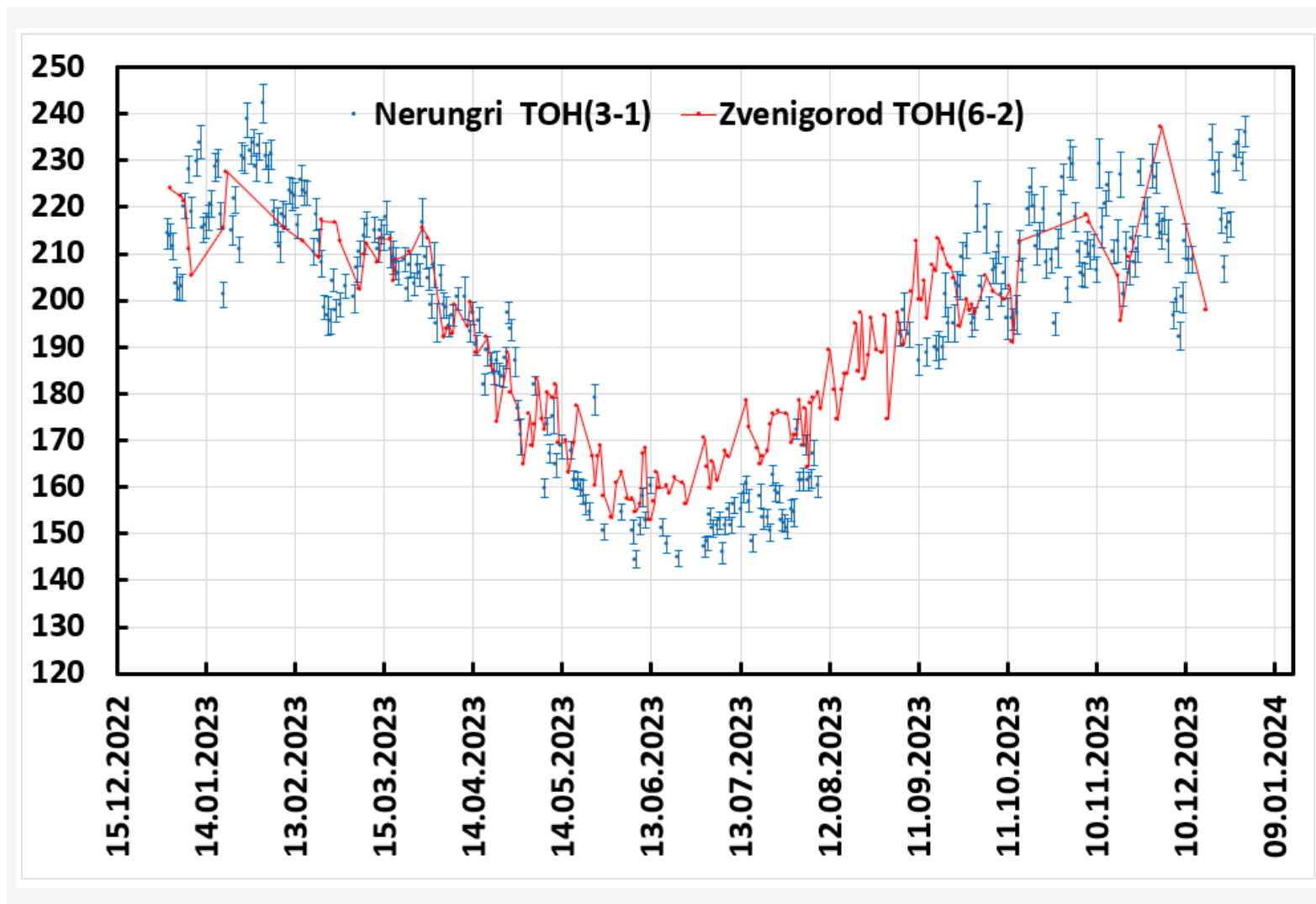
Проанализированы данные о вращательной температуре гидроксила (ОН), полученные в Маймаге за 2000–2015 гг., Торы за 2012–2017 гг. и Звенигород за 2004–2016 гг. Изучены сезонные и межгодовые изменения среднемесячных температур и стандартных отклонений их возмущений с периодами 0,7–8,2 ч. Предполагается, что эти нарушения могут быть связаны с ВГВ в области мезопаузы.

Показано, что месячное стандартное отклонение мезомасштабных возмущений вращательной температуры ОН, измеренное в Торах, обычно больше, чем в Звенигороде и Маймаге. Средние сезонные вариации относительного стандартного отклонения мезомасштабных возмущений демонстрируют максимумы в январе, мае и июле-августе, которые можно объяснить разной орографией и струйными течениями в нижней и средней атмосфере.

Nikolai M. Gavrilov, Andrej A. Popov, Peter Dalin, Vladimir I. Perminov, Nikolay N. Pertsev, Irina V. Medvedeva, Petr P. Ammosov, Galina A. Gavrilyeva, Igor I. Koltovskoi Multiyear variations of time-correlated mesoscale OH temperature perturbations near the mesopause at Maymaga, Tory and Zvenigorod // *Advances in Space Research. Volume 73, Issue 7, 1 April 2024, Pages 3408-3422* <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.05.049>.

Сравнение температуры ОН(6-2) (Звенигород) и ОН(3-1) (Нерюнгри). Отобраны температуры, полученные в 09 часов местного времени, что соответствует 00 UT при сигнал/шум больше 20.

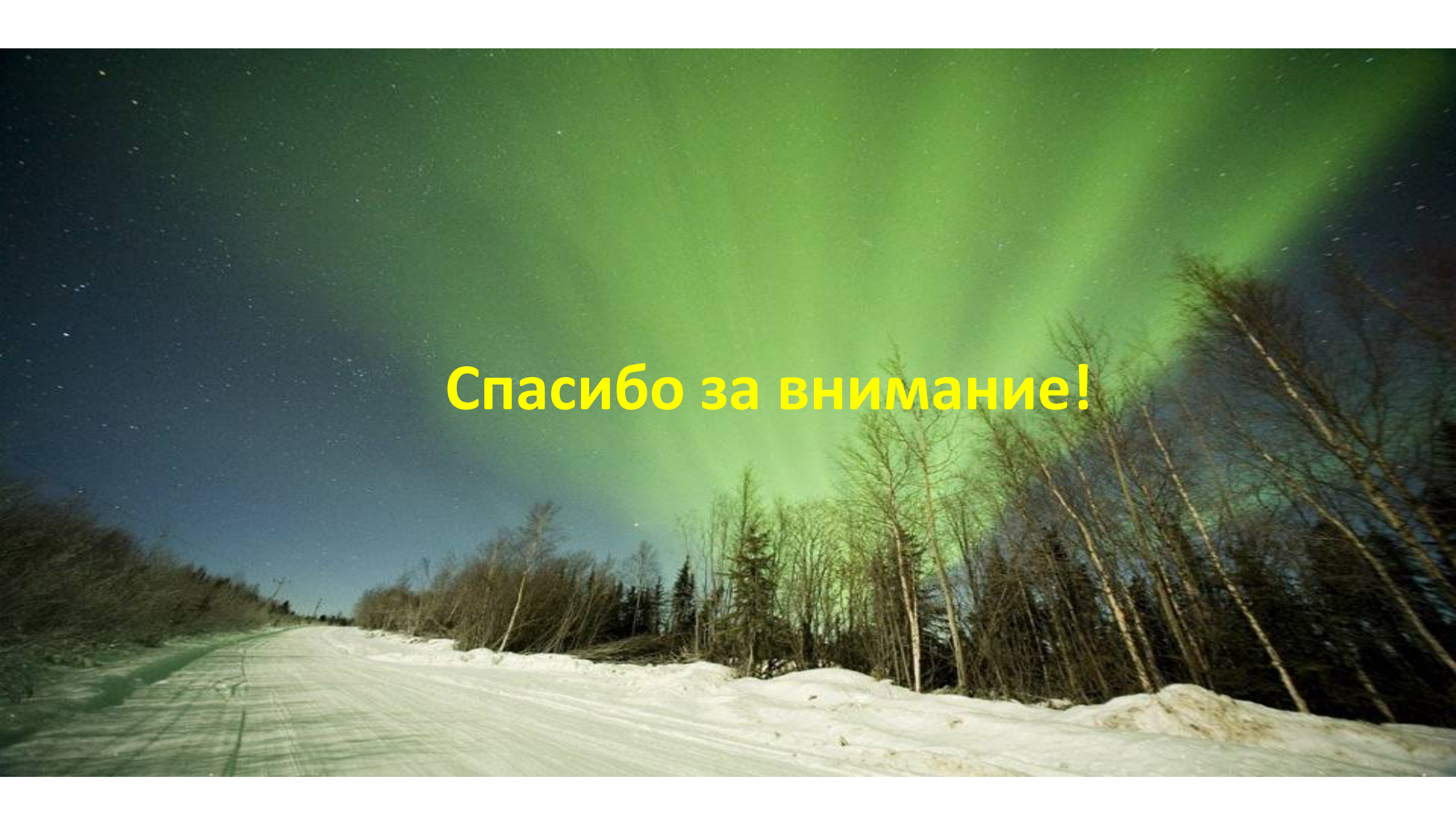
Сезонный ход



Звенигород годовая амплитуда 25.206 К, Нерюнгри 33.558 К.

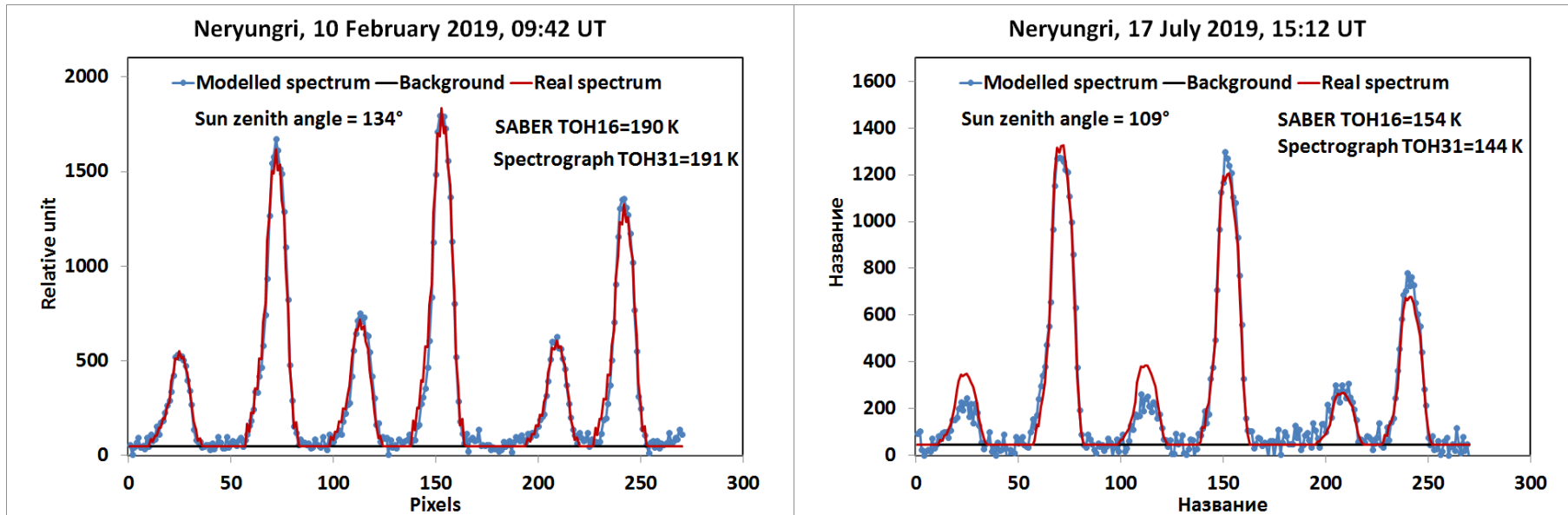
Заключение

Таким образом, инфракрасные спектрографы, регистрирующие полосу ОН(3,1) в далекой инфракрасной области на разнесенных по широте оптических станциях: Тикси (71.6°N, 128.7°E), Маймага (63°N, 129.5°E, возле Якутска), Жиганск и Нерюнгри (56,7°N, 124,7°E) благополучно работают. Налажены и прошли проверку такие работы как: дистанционный контроль, автоматическая передача данных на сервер института. Создана и дополняется единая база данных. Разработаны пакеты программ для управления, накопления, обработки и анализа данных. Показаны разные результаты по стратосферным потеплениям, по активности различных волновых процессов.

A photograph of a snowy road at night. The road is covered in snow and has some tire tracks. On the right side of the road, there is a line of bare trees. The sky is dark blue and green, with a bright green aurora borealis visible in the upper right portion. The text "Спасибо за внимание!" is overlaid in the center of the image.

Спасибо за внимание!

*An example of typical spectra obtained in summer and winter in
Neryungri*



STEVE (Strong Thermal Emission Velocity Enhancement)

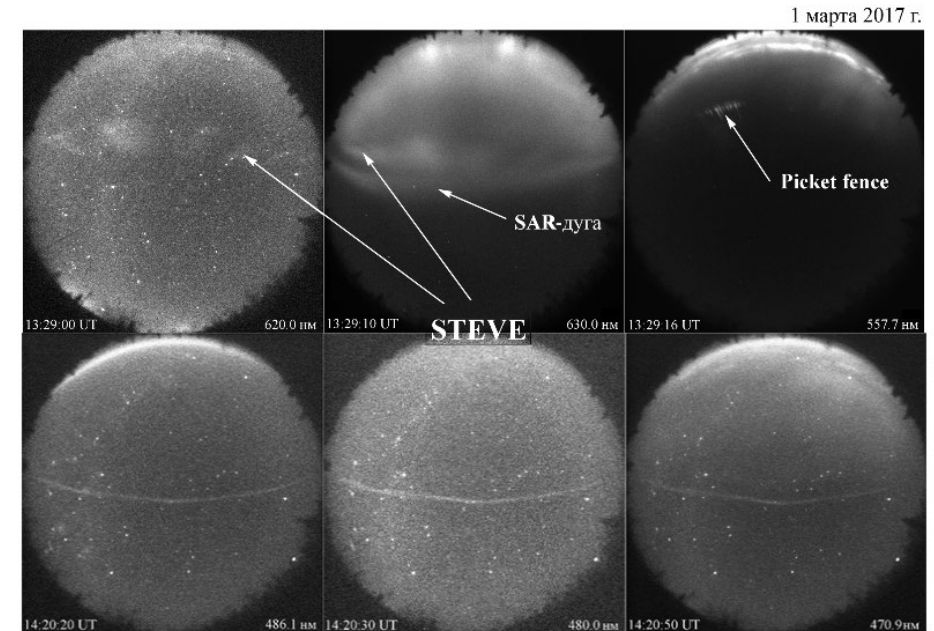


Камера всего неба Keo Sentry с пяти- полостными интерференционными фильтрами для изучения широтной и долготной динамики формирования SAR-дуг, а также электронных и протонных сияний.

С 2013 г ведется ночное наблюдение на ст. Маймага



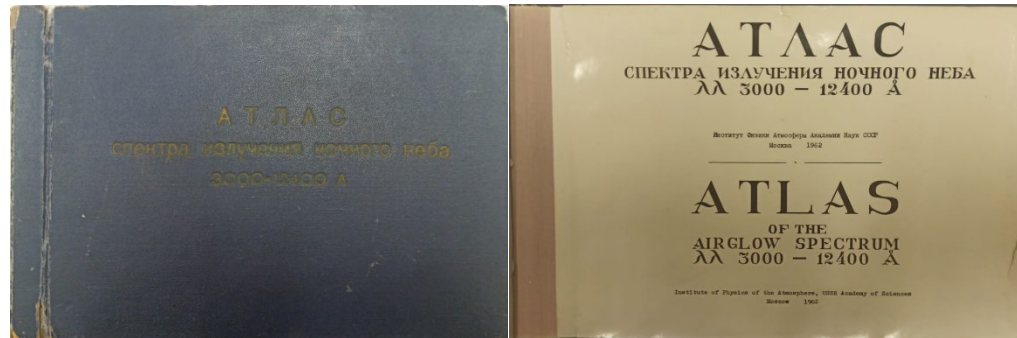
STEVE представляет собой узкую, вытянутую вдоль широты ленту свечения (десятки километров в направлении север-юг и тысячи километров в направлении восток-запад), часто сопровождаемой зелеными образованиями в виде штакетника (Picket fence – PF), и имеющей лиловый оттенок. Свечение вызвано сильным повышением скорости теплового излучения и ассоциируется с чрезвычайно интенсивными ионными дрейфами в ионосфере.



Впервые в России по данным монохроматической камеры всего неба были изучены их яркостные и пространственные характеристики. Показано, что PF и STEVE протекают на одних силовых линиях. Рассчитанная высота свечения STEVE равна ~ 190 км. Интенсивность свечения STEVE в эмиссиях 486.1; 470.9; 480.0; и 620.0 нм составляла единицы Рэлей. В эмиссии 630.0 нм [OI] интенсивность составляла ~ 20 – 30 Рэлей [2].

Основные результаты

Эффект «пятнистости» в распределении полярных сияний, предположительно связанный с неоднородностями электропроводимости или магнитной проницаемости подстилающих пород в недрах Земли. Аналогично, Ю.А. Надубовичем был обнаружен, так называемый «береговой эффект» полярных сияний, т.е. пространственное распределение ленточных форм сияний повторяет береговую линию материка и крупных островов.



Съемки спектра свечения ночного неба, проведенные под Якутском под руководством В.И. Ярина, легли в основу «Атласа спектра излучения ночного неба 3000–12400 Å» (М., Изд. ИФА, 1962, –31 с.).

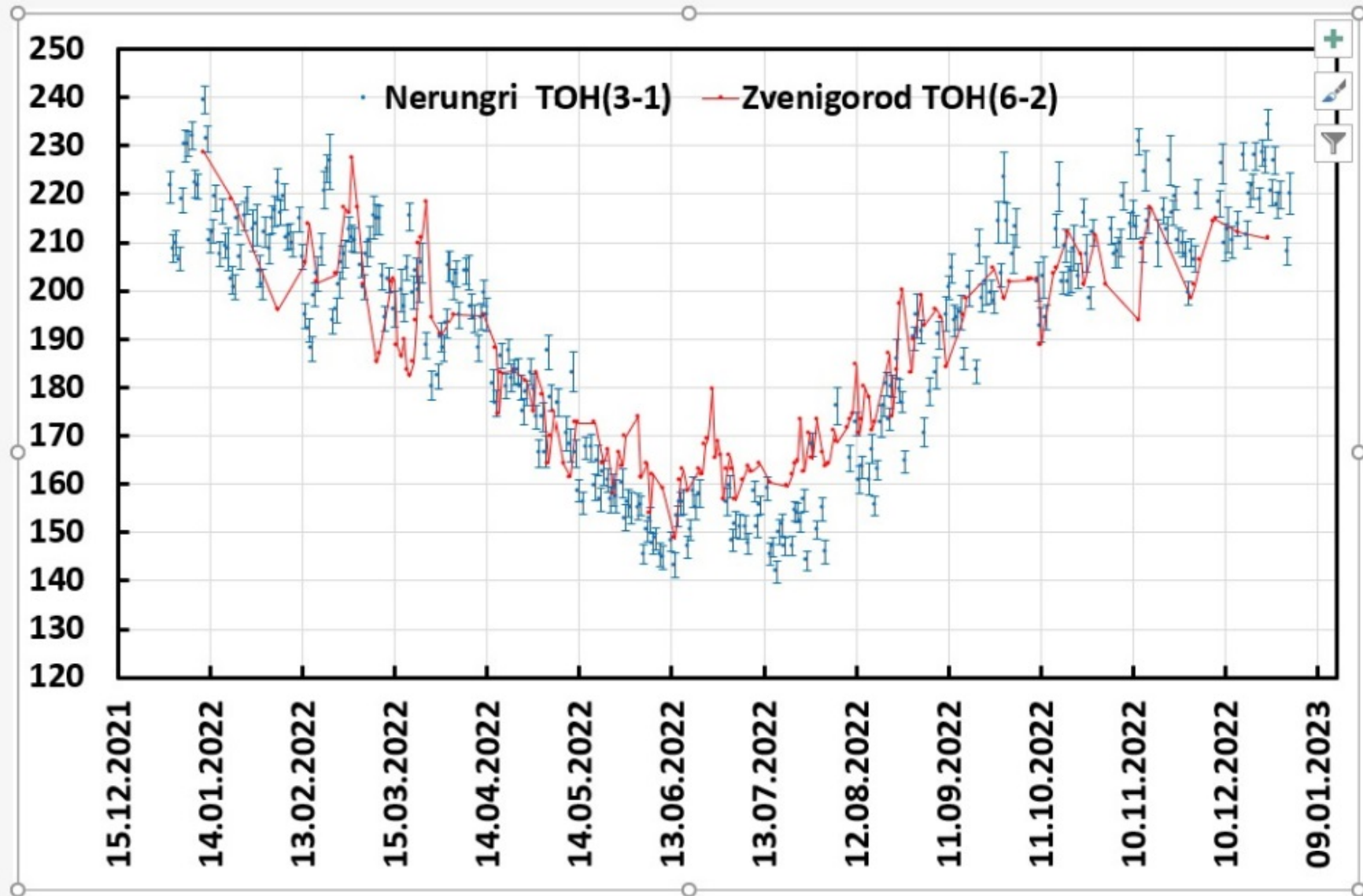


Силами сотрудников лаборатории были созданы различные оптические приборы для исследования полярных сияний, которые показали свою точность и надежность в эксплуатации в суровых условиях Арктики и Антарктиды. (Гусев М.Г. и Николашкин С.В., станция Восток в 27 и 30 САЭ)



сравнение температуры ОН(6-2) (Звенигород) и ОН(3-1) (Нерюнгри). Отобраны температуры, полученные в 09 часов местного времени, что соответствует 00 UT при сигнал/шум больше 20.

Сезонный ход



Данный Атлас составлен Н.Н.Шефовым из фотографий спектров излучения ночного неба, полученных в Советском Союзе в период МГТ. Спектрограммы в области $\lambda\lambda$ 3000 - 5400 Å получены В.И.Яриным в Якутском Филиале Сибирского Отделения АН СССР в Якутске. Спектрограммы в области $\lambda\lambda$ 5200 - 12400 Å получены Н.Н.Шефовым на станции Института физики атмосферы АН СССР в Звенигороде. При наблюдениях использовались стандартные спектрографы СП - 48, СП - 49, СП - 50. Для эмиссий ночного и сумеречного неба даются средние абсолютные интенсивности в реляях. Для полос ОН, наблюдающихся в области спектра $\lambda\lambda$ 5200 - 12400 Å, приведены измеренные длины волн. Все эти данные уже были опубликованы в Сборниках "Спектральные, электрофотометрические и радиолокационные исследования полярных сияний и свечения ночного неба" № 1, 2 - 3, 5, 6, 8, 9 (Сборники, начиная с № 7, имеют название "Полярные сияния и свечение ночного неба"). В Атласе собраны также основные сведения по атомным и молекулярным константам и спектрам, которые постоянно бывают необходимы при исследовании эмиссий ночного неба.

Зав. отделом физики верхней атмосферы ИФА АН СССР

В.И.Красовский

P R E F A C E

N.N.Shefov has compiled this Atlas using the airglow spectrograms obtained in USSR during IGY. The spectrograms in the region $\lambda\lambda$ 3000 - 5400 Å were obtained by V.I.Yarin in Yakut Branch of the Siberian Department of the USSR Academy of Sciences, Yakutsk. The spectrograms in the region $\lambda\lambda$ 5200 - 12400 Å were obtained by N.N.Shefov at the Zvenigorod station of the Institute of Physics of the Atmosphere, USSR Academy of Sciences. The observations were made by means of the standard spectrographs СП - 48, СП - 49, СП - 50. For the nightglow and twilight emissions the average absolute intensities in Rayleigh are given. For the OH bands observed in the region $\lambda\lambda$ 5200 - 12400 Å the measured wavelengths are listed. All these data were published in the "Spectral, Electrophotometrical and Radar Researches of Aurorae and Airglow" No 1,2-3,5,6,8,9 (from the No 7 the title is "Aurorae and Airglow"). The principal data of the atomic and molecular constants and spectra are compiled in the Atlas, for they are very necessary in airglow emission researches.

Chief of the upper Atmosphere Department of the Institute of Physics of the Atmosphere, USSR Academy of Sciences

V.I.Krassovsky

