

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 535.8

**НАЗЕМНЫЕ СПЕКТРОГРАФЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВРАЩАТЕЛЬНОЙ
ТЕМПЕРАТУРЫ ОН(3–1), УСТАНОВЛЕННЫЕ НА МЕРИДИОНАЛЬНОЙ
СЕТИ В ЯКУТИИ**

©2026 г. П. П. Аммосов ^{a*}, Г. А. Гаврильева ^{a}, И. И. Колтовской ^a,
Е. М. Николаев ^a, Н. Н. Юмшанов ^b**

*^aИнститут космофизических исследований и астрономии им. Ю. Г. Шафера
Сибирского отделения Российской академии наук*

Россия, 677027, Республика Саха (Якутия), Якутск, просп. Ленина, 31

*^bТехнический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета
им. М.К. Аммосова*

Россия, 678960, Республика Саха (Якутия), Нерюнгри, ул. Кравченко, 16

**E-mail: ammosov@ikfia.ysn.ru*

***E-mail: gagavrilyeva@ikfia.ysn.ru*

Поступила в редакцию 27.03.2026

После доработки 21.05.2026

Принята к публикации 01.07.2026

Представлены характеристики спектрографов, предназначенных для измерения интенсивности излучения полосы ОН(3–1) и определения температуры атмосферы на высоте примерно 87 км по ее вращательной структуре. Создана первая в Якутии меридиональная сеть из трех станций в широтном диапазоне 56.7°–71.5° с.ш. Основу сети составляют спектрографы Shamrock и модернизированный спектрограф на базе монохроматора МДР-12, оснащенные высокочувствительными охлаждаемыми InGaAs-фотодиодными регистраторами. Разработанная методика измерений и обработки данных обеспечивает определение вращательной температуры с точностью до 2 К при отношении сигнал/шум более 20. Проведенные калибровочные измерения подтвердили согласованность данных, получаемых различными типами приборов сети. Установлено, что систематическая разность температур, измеренных спектрографами Shamrock и МДР-12, составляет +1.83 К при стандартном отклонении 2.64 К, что позволяет привести данные к единой шкале и обеспечить их однородность для исследования пространственно-временной изменчивости параметров мезопаузы, включая изучение отклика на 27-суточные и 11-летние вариации солнечной активности.

Ключевые слова: мезопауза, вращательная температура, спектрограф, ОН(3–1), меридиональная сеть

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование параметров верхней мезосферы и нижней термосферы (Mesosphere and Lower Thermosphere, MLT) представляет значительный интерес для понимания климатических процессов и динамики атмосферы [1]. Мезопауза является высокочувствительным индикатором как климатических изменений, так и воздействия сверху (солнечная и магнитная активность) и снизу (волновые процессы из нижних слоев атмосферы) [2, 3].

Измерение эмиссии гидроксильных радикалов (ОН) в спектре ночного свечения неба зарекомендовало себя как один из наиболее эффективных и доступных наземных методов диагностики этой труднодоступной области атмосферы. Химические реакции с участием озона и атомарного водорода формируют протяженный слой гидроксила с максимумом концентрации на высоте около 87 км и толщиной 6–8 км [4]. Вращательная температура, определяемая по распределению интенсивности в Р-ветвях молекулярных полос ОН, в условиях локального термодинамического равновесия соответствует кинетической температуре окружающей среды на высоте излучения [5].

Для температурного зондирования в последние десятилетия преимущественно используется полоса ОН(3–1) в ближней инфракрасной области (примерно 1500 нм) [6, 7]. Выбор обусловлен ее спектральными преимуществами: меньшим влиянием рассеянного света Луны и звездного фона по сравнению с видимыми полосами (с полосами в видимой области), а также отсутствием в этой области интенсивных авроральных эмиссий, что критически важно для высокоширотных наблюдений [8].

Волновая активность различного характера вносит доминирующий вклад в динамику и термический режим мезопаузы. Волны планетарного масштаба и атмосферные приливы вызывают адиабатическое сжатие и расширение, приводя к суточным колебаниям температуры [9]. Внутренние гравитационные волны (ВГВ), генерируемые в нижних слоях атмосферы и диссипирующие на высотах MLT-области, осуществляют перенос импульса и энергии, формируя характерные профили ветра и температуры [10]. В то время как поведение этих волн в средних широтах изучено относительно хорошо [11, 12], для высокоширотных регионов, в особенности для обширных территорий Сибири и Якутии, существует значительный дефицит систематических наблюдений [13].

Кроме того, мезопауза демонстрирует чувствительный отклик на вариации солнечной активности как в 11-летнем, так и в 27-суточном циклах [14, 15]. Исследование этих эффектов, а также меридиональных градиентов параметров мезопаузы требует создания согласованных измерительных сетей, обеспечивающих получение однородных рядов данных на разнесенных по широте станциях [16, 17].

Настоящая работа посвящена описанию первой меридиональной сети спектрографов для мониторинга температуры мезопаузы в Якутии, ее аппаратного обеспечения, методики измерений и калибровки. Создание такой сети призвано восполнить пробел в инструментальных наблюдениях за динамикой верхней атмосферы в высокоширотном регионе северо-востока России.

2. ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ И СЕТЕЙ НАБЛЮДЕНИЙ

Наземный мониторинг MLT-области осуществляется с помощью различных оптических и радиотехнических методов. Помимо спектроскопии гидроксильного свечения, широко используются лидарные измерения [18], интерферометрия [19], а также наблюдения эмиссий атомарного кислорода (например, линии 557.7 нм) и молекулярного кислорода (полосы атмосферной системы, примерно 865 нм). Каждый метод обладает своими преимуществами и ограничениями по чувствительности, пространственно-временному разрешению и доступности.

Создание согласованных сетей станций стало ключевым направлением в исследованиях атмосферы. Например, глобальная сеть для обнаружения мезосферных изменений (Network for the Detection of Mesospheric Change, NDMC) объединяет более 50 станций по всему миру, стандартизируя методики наблюдений и обработки данных для изучения климатических трендов и волновой активности [20]. В рамках NDMC активно развивается тематическое направление по исследованию широкого спектра геофизических процессов, включая планетарные волны [21].

В России долгосрочные ряды наблюдений за свечением гидроксила и молекулярного кислорода ведутся на Звенигородской научной станции Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (Москва) [22], в Институте солнечно-земной физики СО РАН (Иркутск) [23] и в Институте космических исследований и аэронавтики (Якутск) [13]. Работы Шефова, Перминова и др. [3, 22] внесли значительный вклад в понимание сезонных и многолетних вариаций интенсивности и вращательной температуры OH и O₂. Исследования отклика мезопаузы на короткопериодические изменения солнечной активности также активно проводятся на этой станции [15].

Что касается меридиональных цепочек станций, то зарубежными примерами являются сети в Северной Америке (например, на базе инструментов SATI и SATI-like) и в Европе. Однако аналогичные высокоширотные сети в азиатском секторе, в частности на территории России, до настоящего времени практически отсутствовали. Создание описанной в настоящей работе якутской меридиональной сети направлено на заполнение этого географического пробела и обеспечение уникальных данных о динамике верхней атмосферы в регионе с континентальным климатом и специфическими условиями волнового переноса.

3. ОПИСАНИЕ МЕРИДИОНАЛЬНОЙ СЕТИ

Созданная Северо-Восточная меридиональная сеть спектрографов включает три станции, расположенные вдоль приблизительно одного меридиана (примерно 129° в.д.) в Якутии, и охватывает широтный диапазон от средних до арктических широт (табл. 1, рис. 1).

Таблица 1. Станции меридиональной сети наблюдений

Станция	Широта	Долгота	Спектрограф	Начало работ
Тикси	$71^\circ 41'$ с.ш.	$128^\circ 53'$ в.д.	Shamrock 303i	01.10.2015
Маймага	$63^\circ 03'$ с.ш.	$129^\circ 31'$ в.д.	Shamrock 303i	17.01.2013
Нерюнгри	$56^\circ 40'$ с.ш.	$124^\circ 43'$ в.д.	МДР-12	01.07.2018

Рис. 1. Станции меридиональной сети наблюдений.

Основу сети составляют коммерческие спектрографы Shamrock 303i (Andor Technology, [24]), построенные по схеме Черни–Тернера (рис. 2), с фокусным расстоянием 303 мм. Приборы оснащены моторизованной дифракционной решеткой (600 штр /мм) с номинальной дисперсией 4.62 нм/мм и разрешающей способностью 0.19 нм, что при ширине входной щели 0.2 мм обеспечивает спектральное разрешение около 0.8 нм, достаточное для надежного разделения вращательных линий Р-ветви полосы ОН(3-1). В качестве регистраторов используются высокочувствительные охлаждаемые фотодиодные детекторы iDus DU490A-1.7 на основе арсенида индия–галлия (InGaAs) с рабочим диапазоном 900–1650 нм. Система охлаждения детектора позволяет достичь температуры до -90°C , что обеспечивает низкий темновой шум ($10.1\text{ К}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{пиксель}^{-1}$), в штатном режиме установлена рабочая температура -50°C . Ключевой характеристикой является высокая квантовая эффективность детектора, достигающая более 85% в рабочем диапазоне длин волн (рис. 3), что критически важно для регистрации слабых сигналов эмиссии гидроксила. Узкое поле зрения спектрографа (шириной примерно 3°) минимизирует вклад фоновой засветки от звезд и Луны, а отсутствие интенсивных авроральных эмиссий в ближней ИК-области делает прибор особенно эффективным для высокоширотных наблюдений. Время экспозиции при регистрации спектра составляет 60 с, что позволяет исследовать широкий диапазон частот внутренних гравитационных волн. Детальное описание конструкции и технических характеристик спектрографа Shamrock представлено в работе [25].

Рис. 2. Схема монохроматоров Shamrock 303i и МДР-12 по системе Черни–Тернера.

Рис. 3. Квантовая эффективность детектора.

Третья станция сети (Нерюнгри) оборудована модернизированным спектрографом на базе монохроматора МДР-12 с той же схемой Черни–Тернера (рис. 2). В ходе модернизации в качестве регистратора был установлен InGaAs-детектор, идентичный используемым в Shamrock

303i, что обеспечило совместимость приборов по спектральному диапазону, чувствительности и уровню шумов (рис. 4).

Рис. 4. Фотография монохроматоров МДР-12 (слева) и Shamrock 303i (справа).

Для всех спектрографов сети разработано специализированное программное обеспечение, обеспечивающее полностью автоматический режим работы. Измерения начинаются автоматически при угле погружения Солнца более 9° (астрономические сумерки) и прекращаются с началом рассвета. Реализованы система удаленного управления приборами и ежедневная передача накопленных данных на центральный сервер Института по интернет-каналам связи, что особенно важно для удаленных арктических станций.

4. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Характеристики прибора, такие как геометрические искажения и уширение спектральных линий, вносимые аппаратной функцией системы “спектрограф–регистратор”, оцениваются путем сканирования детектора линейчатым спектром источника слабого света. Передаточные функции всех спектрографов, полученные при использовании в качестве эталонного источника неоновой лампы, и спектральная характеристика системы “спектрограф Shamrock 303i–регистратор” приведены на рис. 5. Аппаратная функция имеет примерно гауссовский вид, а ее полуширина составляет примерно 1 нм (рис. 5а). Неоднородность чувствительности вдоль линейки регистратора показана на рис. 5б. Установлено, что аппаратные функции приборов и характер неоднородности вдоль детекторов существенно не различаются.

Рис. 5. Спектральные характеристики приборов, установленных в Маймаге и Тикси:

Вращательная температура ОН вычисляется по соотношению линий в Р-ветви. Интенсивность линии S зависит от температуры T следующим образом:

$$I(J', J'') = \text{const } A(J', J'') (2J' + 1) \exp \left[-\frac{hc F(J')}{k T_r} \right],$$

где $F(J')$ – энергии возбуждения, J' – вращательное квантовое число, A – коэффициент Эйнштейна, k – постоянная Больцмана, c – скорость света, h – постоянная Планка. Значения $A(J')$ и $F(J')$ взяты из работ [6, 7].

На выходе регистратора выбранная область спектра представлена в виде дискретного ряда $I(i)$, где i – номер пикселя с соответствующим шагом по длине волны. Полученный спектр сопоставляется с набором модельных спектров, рассчитанных для диапазона температур 100–300 К с шагом 1 К. Модельный спектр $S(i, T)$ при заданной температуре T является суммой свертки линейчатого спектра с реальной передаточной функцией прибора и непрерывной

составляющей, которая складывается из собственного излучения ночного неба, называемого континуумом, и из составляющих другой природы (сумерки, лунный свет, звездный фон и др.):

$$S(i) = A + B(i) + \sum_{j=1}^m h(i-j) \cdot I(j),$$

где $h(i)$ – аппаратная функция спектрографа, приведенная на рис. 5а, i – номер пикселя, m – ширина аппаратной функции в пикселях, $A + B(i)$ – фон.

Температуру, при которой отклонение модельного спектра от реального достигает минимума, принимаем за оценку вращательной температуры ОН(3–1). Методика минимизации функционала среднеквадратичного отклонения методом наименьших квадратов подробно описана в работе [26].

Ошибка оценки температуры состоит из случайной и систематической составляющих, где случайные ошибки вызваны шумовой составляющей, а источником систематических ошибок могут быть погрешности при определении передаточной функции спектрограф–детектор, неоднородность чувствительности регистратора и ошибки при определении параметров фона. Как видно на рис. 5б, отклик регистратора вдоль спектра однороден, разброс имеет случайный характер и вызван шумом самого детектора. Ошибка температуры, обусловленная неточностью определения непрерывной составляющей спектра, зависит также от случайной компоненты. Поэтому систематическую ошибку измерения температуры можно представить в виде 2ε , где ε – случайная составляющая ошибки.

Для оценивания влияния случайного шума на точность определения температуры был использован метод Монте–Карло. В качестве исходного сигнала были использованы модельные спектры при различных температурах с наложением белого гауссовского шума с различными уровнями. Затем подгонкой методом наименьших квадратов для каждого модельного спектра определялась температура. Для каждого значения температуры и уровня шума проводилось 100 испытаний. Зависимость суммы погрешностей оценки температуры 3ε от отношения сигнал/шум и исходной температуры показана на рис. 6. Известно, что температура атмосферы на высоте излучения ОН может меняться от 140 К летом до 250 К зимой. На рис. 6 видно, что для этого диапазона температур ошибка измерения варьируется в пределах 2–10 К в зависимости от уровня сигнала. При отношении сигнал/шум более 20 суммарная ошибка в заданной области не превышает 2 К. Следовательно для анализа необходимо выбирать спектры, интенсивность которых превышает шум регистрации не менее, чем в 20 раз.

Рис. 6. Суммарная погрешность оценки температуры при различных отношениях сигнал/шум.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ КАЛИБРОВОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И ОДНОРОДНОСТЬ ДАННЫХ СЕТИ

Взаимная калибровка двух спектрографов Shamrock 303i была проведена на станции Маймага в период с 5 по 15 августа 2015 г. На рис. 7 представлены средние значения температур, полученные в течение пяти ночей при отношении сигнал/шум более 20. Видно, что разность между измерениями двух спектрографов не превышает погрешности измерения 2 К.

Рис. 7. Средненочные значения температур, полученные при калибровочных измерениях двумя спектрографами на станции Маймага

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что разность измерения температуры в Маймаге и Тикси, обусловленная инструментальными ошибками, не превышает 2 К.

Для интеграции спектрографа МДР-12 (станция Нерюнгри) в общую сеть и оценки систематического смещения между приборами разных типов в 2025 г. была проведена серия одновременных наблюдений с эталонным спектрографом Shamrock 303i на станции Маймага. Измерения выполнялись в течение 19 ночей в период с 17 июня по 28 июля 2025 г.

Результаты калибровки (рис. 8) демонстрируют высокую степень корреляции данных, полученных на спектрографах разных типов. Среднеквадратичное отклонение разностей температур между МДР-12 и Shamrock 303i составило 2.64 К, что соответствует общей погрешности метода. Среднее смещение составило +1.83 К, при этом спектрограф МДР-12 в среднем завышает показания температуры относительно Shamrock 303i. Данное смещение является систематическим и может быть учтено при обработке данных с МДР-12 для их приведения к единой шкале сети. Точки на графике группируются вблизи линии 1:1, а наблюдаемый разброс хорошо укладывается в оцененные погрешности измерений. Таким образом, спектрограф МДР-12 после калибровки может быть полноценно интегрирован в меридиональную сеть для получения однородных рядов данных.

Рис. 8. Средненочные значения температур, полученные при калибровочных измерениях двумя спектрографами на станции Маймага (Shamrock) и Нерюнгри (MDR-12).

6. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ СЕТИ

Созданная Северо-Восточная меридиональная сеть спектрографов представляет собой современный исследовательский комплекс для мониторинга температуры мезопаузы по эмиссии ОН(3–1). Сеть включает три станции, расположенные в Якутии вдоль меридиана 129° в.д. в широтном диапазоне 56.7°–71.5° с.ш.

Разработанная методика измерений и обработки данных обеспечивает определение вращательной температуры с точностью до 2 К при отношении сигнал/шум более 20. Проведенные калибровочные измерения подтвердили согласованность данных, получаемых

различными типами спектрографов сети. Установлено, что систематическое смещение между спектрографами Shamrock 303i и МДР-12 составляет +1.83 К при стандартном отклонении 2.64 К, что позволяет привести данные к единой шкале и обеспечить их однородность. Получаемые однородные ряды данных позволяют исследовать широкий круг задач:

- изучение годового хода и суточных вариаций температуры мезопаузы в арктических и субарктических широтах;
- исследование пространственно-временной изменчивости характеристик внутренних гравитационных волн и атмосферных приливов на меридиональном разрезе;
- анализ отклика термического режима верхней атмосферы на 27-суточные и 11-летние вариации солнечной активности в зависимости от широты [14];
- изучение связи между стратосферными возмущениями (например, внезапными стратосферными потеплениями) и параметрами мезопаузы;
- определение широтных градиентов температуры и их сезонной изменчивости на протяжении более 15° по широте в Якутии;
- выявление долгосрочных тенденций в температуре мезопаузы в контексте изменения климата;
- интеграция данных созданной сети с наблюдениями на других станциях [20, 22,23], а также со спутниковыми измерениями (например, SABER/TIMED, SCIAMACHY/Envisat, MSL/AURA) для комплексного изучения пространственно-временной изменчивости MLT-области в Северном полушарии;
- исследование механизмов передачи энергии через анализ корреляций между характеристиками ВГВ в мезопаузе и возмущениями в ионосфере.

Созданная меридиональная сеть гармонизирована по методике измерений и обработки с международными стандартами сети NDMC. Как показано в табл. 2, технические характеристики спектрографов сопоставимы с параметрами приборов серии GRIPS [27], что обеспечивает прямую сопоставимость данных с архивами глобального мониторинга.

Таблица 2. Сравнение характеристик спектрографов якутской меридиональной сети и приборов серии GRIPS (NDMC)

Параметр	Якутская сеть (Shamrock 303i)	Сеть NDMC / GRIPS-5 [Bittner et al., 2010]
Спектральный диапазон	900–1650 нм	1500–1550 нм
Детектор	InGaAs, 512 пикселей, охлаждение до –90 °С	InGaAs, 512 пикселей
Спектральное разрешение	~0.8 нм (при щели 0.2 мм)	~0.8–1.0 нм

Время экспозиции	60 с	15 с (минимальное), режим усреднения не менее 60 с
Точность определения температуры	Не более 2 К (при $S/N > 20$)	~2 К (при усреднении не менее 1 мин)
Поле зрения	~3° (круговое)	7.9° × 7.9° (квадратное)
Диапазон измеряемых температур	140–250 К (расчетный)	180–240 К (наблюдаемый в кампании)

Уникальное географическое положение сети (56.7°–71.5° с.ш., примерно 124.43°–129°31 в.д.) позволяет получать данные, дополняющие существующие мировые ряды наблюдений, и открывает перспективы для совместного анализа с данными других станций, а также со спутниковыми измерениями (SABER/TIMED, MSL/AURA). В перспективе возможна интеграция сети в расширенную архитектуру NDMC, что повысит репрезентативность глобальных моделей мезопаузы и улучшит возможности прогнозирования отклика верхней атмосферы на солнечную и геомагнитную активность.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена первая в Якутии меридиональная сеть станций для спектроскопического мониторинга температуры мезопаузы по эмиссии OH(3–1). Сеть включает три станции (Тикси, Маймага, Нерюнгри), расположенные вдоль меридиана, идущего примерно по 129° в.д. в широтном диапазоне 56.7°–71.5° с.ш.

Разработана и апробирована методика измерений и обработки данных, обеспечивающая определение вращательной температуры с точностью до 2 К при отношении сигнал/шум более 20. Проведенные калибровочные кампании подтвердили высокую степень согласованности данных, получаемых как на идентичных спектрографах Shamrock 303i, так и на модернизированном спектрографе МДР-12. Установленное систематическое смещение между разными типами приборов (+1.83 К) позволяет приводить все данные сети к единой шкале, обеспечивая их однородность.

Созданная сеть предоставляет уникальную возможность для получения длинных непрерывных рядов наблюдений, которые станут основой для фундаментальных исследований динамических процессов, климатических тенденций и пространственно-временной изменчивости в высокоширотной верхней атмосфере северо-востока России.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят технический персонал станций за обеспечение непрерывной работы оборудования.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-27-20119, <https://rscf.ru/project/25-27-20119/>. Экспериментальные данные были получены в рамках Государственного задания № 126021217280-4

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Brasseur G., Solomon S.* Aeronomy of the Middle Atmosphere: Chemistry and Physics of the Stratosphere and Mesosphere. Dordrecht. Springer, 2005.
<https://doi.org/10.1007/1-4020-3824-0>
2. *Beig G., Scheer J., Mlynczak M. G., Keckhut P.* Rev. Geophys. 2008. V. 46. RG3002.
<https://doi.org/10.1029/2007RG000236>
3. *Шефов Н.Н., Семёнов А.И., Хомич В.Ю.* Излучение верхней атмосферы – индикатор ее структуры и динамики. Москва: ГЕОС, 2006.
4. *Baker D.J., Stair A.T. Jr.* Phys. Scr. 1988. V. 37. P. 611.
<https://doi.org/10.1088/0031-8949/37/4/021>
5. *She C.Y., Lowe R.P.* J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 1998. V. 60. P. 1573.
[https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(98\)00082-0](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(98)00082-0)
6. *Mies F.H.* J. Mol. Spectrosc. 1974. V. 53. P. 150.
[https://doi.org/10.1016/0022-2852\(74\)90125-8](https://doi.org/10.1016/0022-2852(74)90125-8)
7. *Krassovsky V.I., Shefov N.N., Yarin V.I.* Planet. Space Sci. 1962. V. 9. P. 883.
[https://doi.org/10.1016/0032-0633\(62\)90008-9](https://doi.org/10.1016/0032-0633(62)90008-9)
8. *Von Savigny C., Eichmann K.-U., Llewellyn E. J., Bovensmann H., Burrows J. P., Bittner M., Höppner K., Offermann D., Taylor M. J., Zhao Y., Steinbrecht W., Winkler P.* / Geophys. Res. Lett. 2004. V. 31. P. L15111. <https://doi.org/10.1029/2004GL020410>
9. *Pancheva D., Mitchell N., Middleton H., Muller H. J.* J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2003. V. 65. P. 1. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(02\)00084-6](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(02)00084-6)
10. *Holton J.R.* J. Atmos. Sci. 1982. V. 39. P. 791.
[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1982\)039<0791:TROGWI>2.0.CO](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1982)039<0791:TROGWI>2.0.CO)
11. *Bittner M., Offermann D., Graef H.-H., Donner M., Hamilton K.* J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2002. V. 64. P. 1147. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(02\)00065-2](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(02)00065-2)

12. *Reisin E.R., Scheer J. J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2004. V. 66. P. 655.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2004.01.017>
13. *Gavrilyeva G.A., Ammosov P.P. J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2002. V. 64. P. 985.
[https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(02\)00052-4](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(02)00052-4)
14. *Gavrilyeva G.A., Ammosov P.P. Atmos. Chem. Phys.* 2018. V.18. P. 3363.
<https://doi.org/10.5194/acp-18-3363-2018>
15. *Перминов В. И., Перцев Н. Н., Далин П. А., Семенов В. А., Суходоев В. А., Медведева И. В., Железнов Ю. А. Геомагнетизм и аэрономия.* 2023. Т. 63. № 1. С. 63.
<https://doi.org/10.31857/S0016794022060116>
[*Perminov V.I., Pertsev N.N., Dalin P.A., Semenov V.A., Sukhodoev V.A., Medvedeva I.V., Zheleznov Y.A. Geomagn. Aeron.* 2022. V. 62. № 7. P. 835.
<https://doi.org/10.1134/S0016793222600369>]
16. *Offermann, D. // Eos Trans. AGU.* 1982. 63(51). 1223.
<https://doi.org/10.1029/EO063i051p01223-01>
17. *Scheer J., Reisin E.R., Gusev O.A., French W.J.R., Hernandez G., Huppi R., Ammosov P.P., Gavrilyeva G.A., Offermann D. J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2006. V. 68. P. 1698.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2005.12.009>
18. *She C.Y., Yu J.R. Geophys. Res. Lett.* 1994. V. 21. P. 1771.
<https://doi.org/10.1029/94GL01417>
19. *Васильев Р.В., Артамонов М.Ф., Белецкий А.Б., Жеребцов Г.А., Медведева И.В., Михалёв А.В., Сыренова Т.Е. Солнечно-земная физика.* 2017. Т. 3. № 3. С. 70.
<https://doi.org/10.12737/szf-62202008>
20. *Reisin E.R., Scheer J., Dyrland M.E., Sigernes F., Deehr C.S., Schmidt C., K. Höppner, Bittner M., Ammosov P.P., Gavrilyeva G.A., Stegman J., Perminov V.I., Semenov A.I., Knieling P., Koppmann R., Shiokawa K., Lowe R.P., López-González M.J., Rodríguez E., Zhao Y., Taylor M.J., Buriti R.A., Espy P.J., French W.J.R., Eichmann K.-U., Burrows J.P., von Savigny C. J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2014. V. 119. P. 71. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2014.07.002>
21. *Offermann, D., Gusev O., Donner M., Forbes J. M., Hagan M., Mlynczak M. G., Oberheide J., Preusse P., Schmidt H., Russell, J. M. III. J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. № 6. P. D06110.
<https://doi.org/10.1029/2008JD010662>
22. *Перминов В.И., Перцев Н.Н., Далин П.А., Железнов Ю. А., Суходоев В. А., Орехов М. Д. // Геомагнетизм и аэрономия.* 2021. Т. 61. № 4. С. 532.
<https://doi.org/10.31857/S0016794021040118>
[*Perminov V. I., Pertsev N. N., Dalin P. A., Zheleznov Yu. A., Sukhodoev V. A., Orekhov M. D. Geomagn. Aeron.* 2021. V. 61. № 4. P. 589. <https://doi.org/10.1134/S0016793221040113>]

23. Васильев Р.В., Артамонов М.Ф., Белецкий А.Б., Зоркальцева О.С., Комарова Е.С., Медведева И.В., Михалев А.В., Подлесный С.В., Ратовский К.Г., Сыренова Т.Е., Тацилин М.А., Ткачев И.Д. Солнечно-земная физика. 2020. Т. 6. № 2. С. 105.
<https://doi.org/10.12737/szf-62202008>.
24. Andor Technology. Shamrock 303 Spectrograph Product Manual
<https://andor.oxinst.com/downloads/view/shamrock-303-spectrograph-product-manual>
25. Колтовской И.И., Аммосова А.М., Сивцева В.И. Материалы XIX Всерос. конф. молодых ученых. Нерюнгри: Изд-во Техн. ин-та (ф) СВФУ, 2018. С. 88.
26. Gavrilieva G.A., Ammosov P.P., Koltovskoi I.I., Sivtseva V.I., Iumshanov I.N.N. AIP Conf. Proc. 2021. V. 2328. P. 050010. <https://doi.org/10.1063/5.0042255>
27. Schmidt C., Höppner K, Bittner M. J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2013. V. 102. P. 125.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.05.001>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Станции меридиональной сети наблюдений

Рис. 2. Схема монохроматоров Shamrock 303i и МДР-12 по системе Черни–Тернера

Рис. 3. Квантовая эффективность детектора

Рис. 4. Фотография монохроматоров МДР-12 (слева) и Shamrock 303i (справа)

Рис. 5. Спектральные характеристики приборов, установленных в Маймаге и Тикси:
а – передаточная функция, **б** – неоднородность чувствительности детектора

Рис. 6. Суммарная погрешность оценки температуры при различных отношениях сигнал/шум

Рис. 7. Средненочные значения температур, полученные при калибровочных измерениях двумя спектрографами на станции Маймага

Рис. 8. Средненочные значения температур, полученные при калибровочных измерениях двумя спектрографами на станции Маймага (Shamrock) и Нерюнгри (MDR-12)

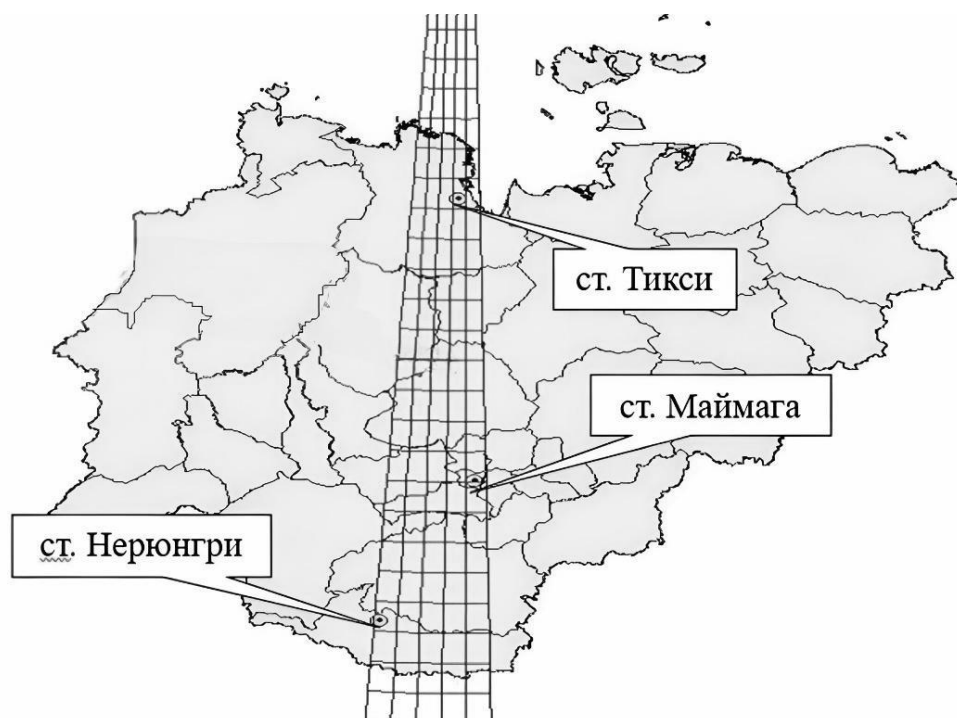


Рис. 1.

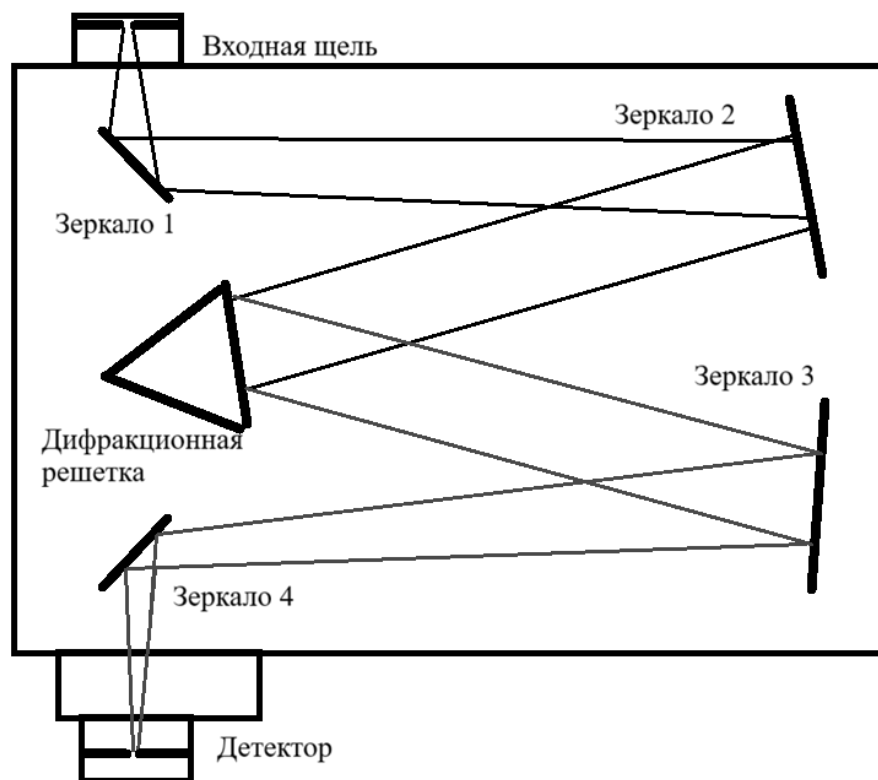


Рис. 2.

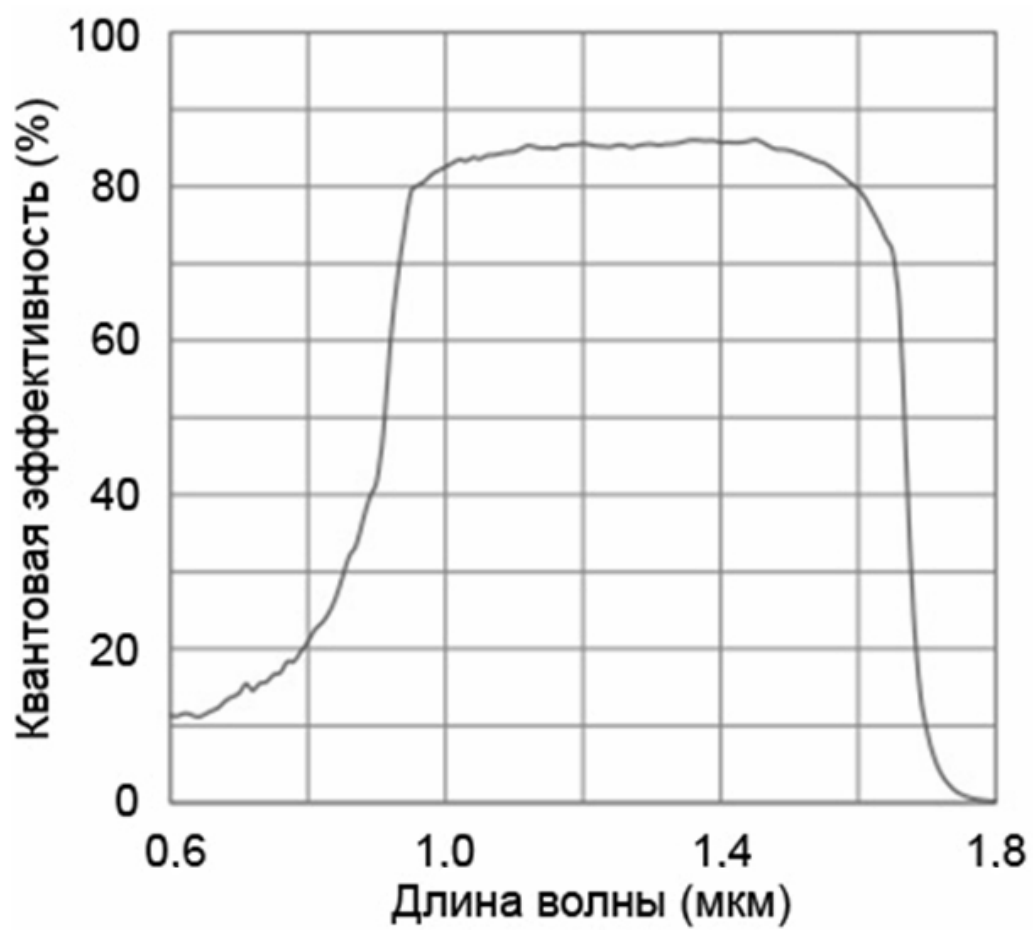


Рис. 3.



Рис. 4.

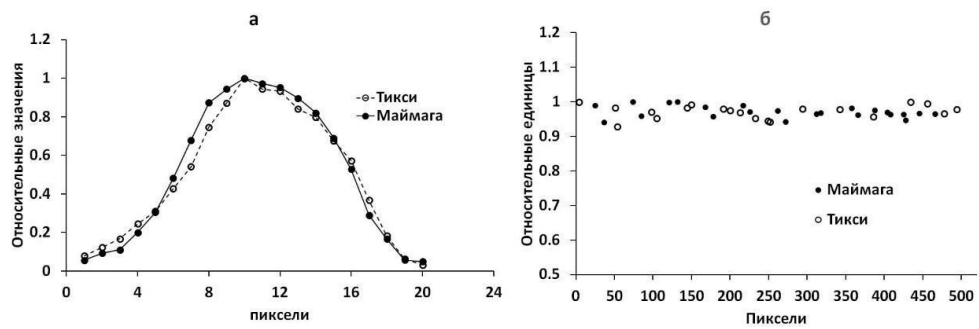


Рис. 5.

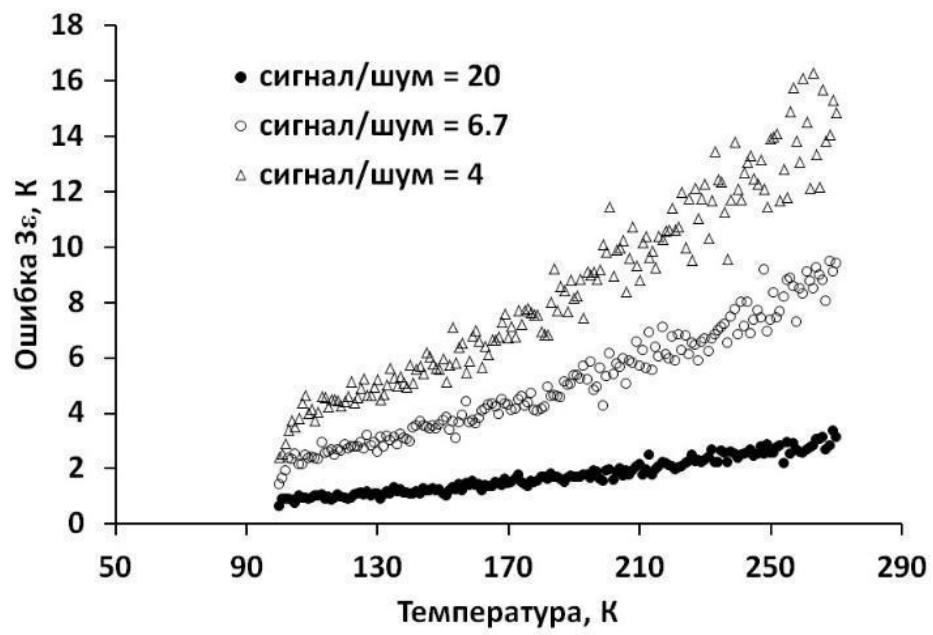


Рис. 6.

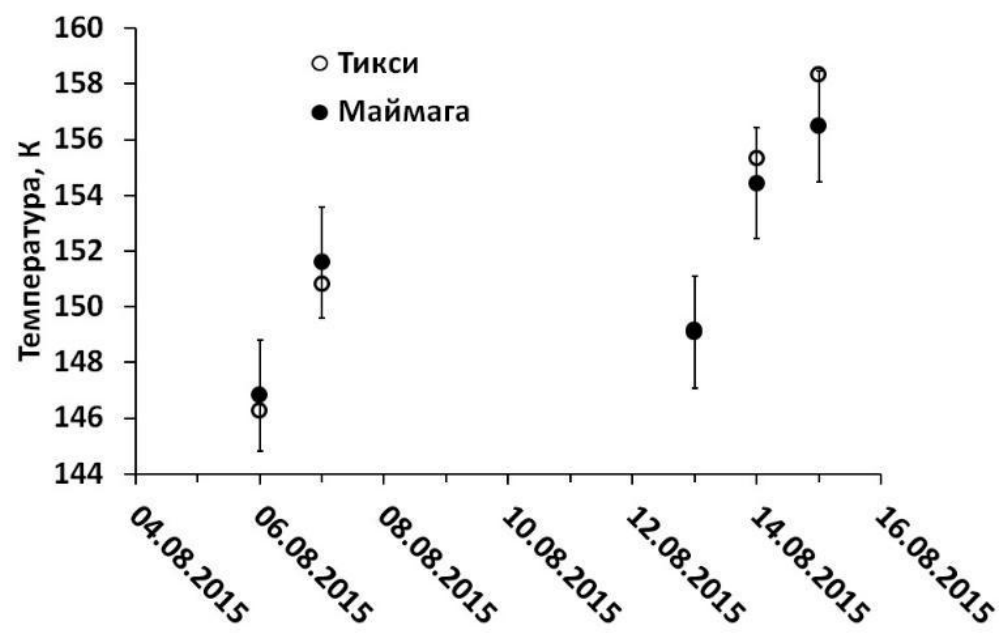


Рис. 7.

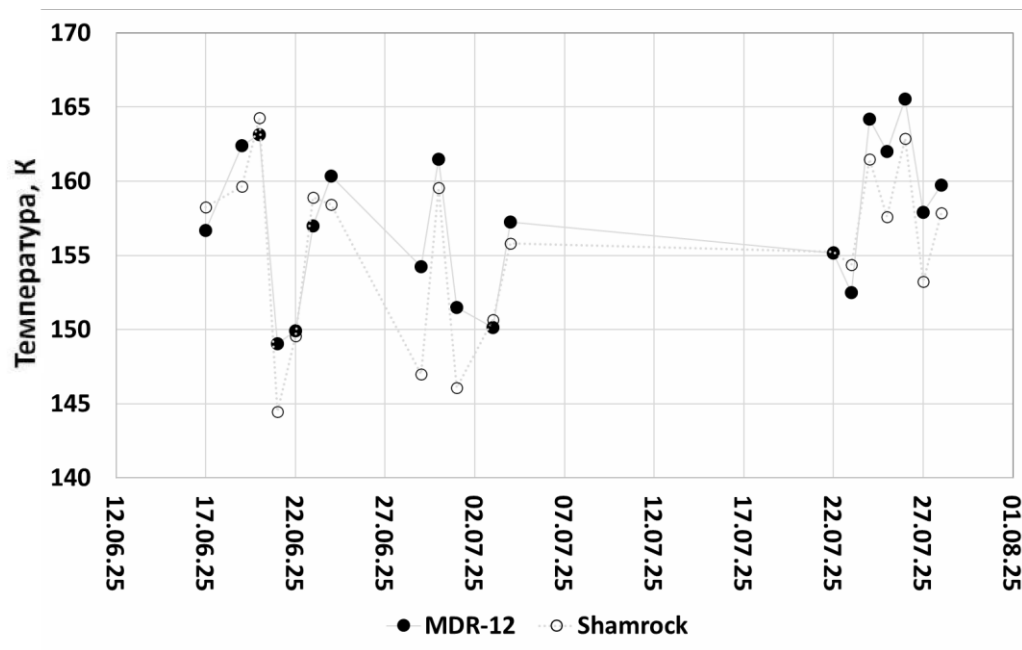


Рис. 8.