



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра экологии и физики природной среды

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
Бакалаврская

На тему Межгодовая и внутрисезонная изменчивость ВГВ на основе оптических измерений на станции Алма-Ата

Исполнитель Попов Андрей Алексеевич  
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель доктор физ. -мат. наук, профессор  
(ученая степень, ученое звание)

Погорельцев Александр Иванович  
(фамилия, имя, отчество)

«К защите  
допускаю»  
Заведующий  
кафедрой

(подпись)

кауч. - докт. мат. н., доцент

(ученая степень, ученое звание)

Бобровский А. П.

(фамилия, имя, отчество)

«10» 06 2016г.

Санкт-Петербург  
2016



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра экологии и физики природной среды

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**

Бакалаврская

**На тему** Межгодовая и внутрисезонная изменчивость ВГВ на основе оптических измерений на станции Алма-Ата

**Исполнитель** Попов Андрей Алексеевич

(фамилия, имя, отчество)

**Руководитель** доктор физ. -мат. наук, профессор

(ученая степень, ученое звание)

Погорельцев Александр Иванович

(фамилия, имя, отчество)

**«К защите**

**допускаю»**

**Заведующий**

**кафедрой**

---

(подпись)

---

(ученая степень, ученое звание)

---

(фамилия, имя, отчество)

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016г.

Санкт–Петербург

2016

## Оглавление

Использованные сокращения и основные обозначения. ....	3
Введение.....	4
Глава 1. Атмосферные волны и УКМО данные. ....	5
1.1 Современное состояние проблемы. ....	5
1.2 Внутренние гравитационные волны. ....	6
1.3 Планетарные волны. ....	8
1.5 Данные метеорологического бюро Великобритании.....	10
Глава 2. Измерения и обработка результатов. ....	15
2.1 Спектрофотометрическая аппаратура. ....	15
2.2 Измерения с помощью SATI (the Spectral Airglow Temperature Imager)..	19
2.3 Обработка результатов измерений.....	25
2.4 Фурье преобразование данных. ....	26
Глава 3. Результаты.....	31
3.1 Данные метеорологического бюро Великобритании. Ситуация за январь-март 2016 года. ....	31
3.2 Выводы.....	35
3.3 Заключение .....	37
Используемая литература.....	38
Приложения .....	41

## Использованные сокращения и основные обозначения.

ВГВ – Внутреннегравитационные волны

SATI – the Spectral Airglow Temperature Imager

ПЗС, CCD – Прибор с зарядовой связью (Charge-Coupled Device)

ВСП – Внезапное стратосферное потепление

## Введение.

Важнейшим свойством атмосферных гидродинамических волн является то, что при распространении из нижних слоев в более высокие слои, они переносят энергию и импульс. Диссипируя на высотах средней атмосферы и термосферы, эти волны передают энергию и импульс среде, воздействуя, таким образом, на тепловой баланс и среднезональную циркуляцию. Турбулентность, тесно взаимодействуя с атмосферными волнами, рождает вертикальные тепловые и диффузионные потоки.

Изучение взаимодействия динамических процессов, протекающих в различных слоях атмосферы Земли и взаимодействия самих слоев и оболочек Земли, является одной из важнейших фундаментальных задач геофизики. Последние годы и десятилетия характеризуются мощным развитием аэрокосмических и наземных систем наблюдения за состоянием и динамикой атмосферы на различных высотах, идет накопление новых данных измерений, требующих дальнейшего осмысления, обработки и интерпретации. На основе имеющегося материала измерений разрабатываются глобальные эмпирические и полуэмпирические модели атмосферных характеристик, учитывающие временную и пространственную изменчивость метеорологических полей.

Для выполнения данной квалификационной работы была сформулирована следующая задача: анализ внутрисезонной изменчивости внутренних гравитационных волн (ВГВ) на основе оптических измерений станции Алма-Ата.

## Глава 1. Атмосферные волны и УКМО данные.

### 1.1 Современное состояние проблемы.

Внутренние гравитационные волны (ВГВ) — распространение колебаний воздушных масс, имеющих в отличие от обычных звуковых (акустических) волн, помимо продольной, ещё и поперечную, сдвиговую составляющую. Она возникает благодаря действию силы тяжести: более тяжёлая часть сжатия стремится опуститься вниз, а более лёгкая область разрежения стремится всплыть наверх; это приводит к колебаниям вдоль направления ускорения свободного падения, даже если волна сжатия и разрежения распространяется поперёк ускорения свободного падения.

Более полувека назад была выявлена связь колебаний в верхней атмосфере с ВГВ, при этом использовался метод серебристых облаков, и аналогично этому, в настоящее время используются изображения эмиссионных полей в верхней атмосфере. Благодаря возросшим техническим возможностям, с использованием ПЗСтелевизионной техники удается получать пространственное распределение интенсивности излучения гидроксила, атмосферного кислорода выявляющую волновую структуру в верхней атмосфере и ее динамику. [1].

За последние десятилетия стала вырисовываться важная роль внутренних гравитационных волн в процессах верхней атмосферы. Со времен, когда в 60-ых годах производились испытания ядерного оружия, в атмосфере были зарегистрированы возмущения в верхней атмосфере, стали предполагать, что ВГВ генерируются в основном в тропосфере или на границе во время активных метеорологических процессов. Такие волны беспрепятственно проникают в верхнюю атмосферу.[2]

В ряде теоретических работ [3], [5], [6], [7], [8] отмечено как меняется энергетика верхней атмосферы при прохождении ВГВ, были оценены потоки энергии от ВГВ в верхнюю атмосферу. Но в отличие от теоретических исследований, экспериментальная методика была долгое время ограничена. Наблюдение ВГВ у поверхности Земли затруднительно из-за малой амплитуды волны на этом уровне и помех от флуктуаций атмосферного давления. К тому же нельзя было проследить эволюцию характеристик ВГВ и степень воздействия на окружающую среду при прохождении их в верхнюю атмосферу.

В результате исследований и на основе обработанных результатов, обнаружены все перечисленные возмущения в разных слоях атмосферы.

## 1.2 Внутренние гравитационные волны.

Атмосферные волны, которые называются внутренними гравитационными, обусловлены действием архимедовых сил плавучести в атмосфере с переменной по высоте плотностью. Периоды ВГВ превышают некоторый минимальный предел – период Бранта-Вяйсяля  $\tau_g$ , который определяется по формуле [4]:

$$\tau_g = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{\gamma k T}{(\gamma - 1) M m_H g^2}} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{\gamma H}{(\gamma - 1) g}} \quad (1.1)$$

Где

$\gamma$  – показатель адиабаты,

$k$ –постоянная Больцмана,

$T$ – температура,

$M$  – молекулярная масса,

$m_H$  – масса атома водорода,

$g$ –ускорение свободного падения,

$H$ – высота однородной атмосферы.

Распространение волны с периодом  $\tau$  вверх происходит в направлении, зенитный угол  $\theta$  которого определяется соотношением

$$\cos\theta = \frac{\tau g}{\tau} \quad (1.2)$$

Энергия при распространении волн вверх сохраняется, амплитуда увеличивается, поскольку плотность экспоненциально убывает с высотой

$$A = A_0 \cdot \exp\left(\frac{Z - Z_0}{2\alpha h}\right) \quad (1.3)$$

Коэффициент  $\alpha$  учитывает поглощение волны. Предельная высота обычно не превосходит 100 – 130км. Вертикальные длины волн  $\lambda_z$  изменяются от нескольких до десятков километров, а горизонтальные длины волн  $\lambda_x$  – от сотен до тысяч километров

Предельная горизонтальная фазовая скорость ВГВ оценивается выражением [8]



$$C_x = \sqrt{\frac{\gamma k T}{M m_H} \frac{1 - \left(1 - \frac{\tau_g^2}{\tau^2}\right) \cdot \frac{\tau_g^2}{\tau^2}}{1 - 1.21 \cdot \frac{\tau_g^2}{\tau^2}}} \approx 0,9 \cdot \sqrt{\frac{\gamma k T}{M m_H} \left(1 - \frac{\tau_g^2}{\tau^2}\right)} \quad (1.4)$$

Приближенное выражение с погрешностью менее 3% справедливо для  $\tau > 20$  мин [10]. Для ВГВ существует дисперсионное соотношение, согласно которому при уменьшении длины волны их скорость стремится к нулю, а при увеличении – к скорости звука, определяется формулой

$$C = \sqrt{\frac{\gamma k T}{M m_H}} \quad (1.5)$$

### 1.3 Планетарные волны.

В атмосфере Земли, как в колебательной системе с широким спектром собственных частот, отображаются различные физические процессы, под действием которых возникают колебания. Атмосфера обладает гироскопической жесткостью, реагируя на всякое возмущение появлением в ней колебательных движений. Возникающие при этом волны, являются важным компонентом атмосферных колебаний. Такие планетарные волны, по определению Россби, представляют собой атмосферные возмущения глобальной горизонтальной протяженности. Они фактически означают отклонение от симметричных движений, происходящих в средних и высоких широтах с временным масштабом больше суток [11]. Особенности

планетарных волн состоят в их глобальной протяженности и большой амплитуде в холодные периоды года и очень малые – в летние периоды [12].

На основе проведенных исследований установлена зависимость структуры возмущений от горизонтального волнового числа  $k$ , которое связано соотношением с длиной волны  $\lambda$ .

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1.6)$$

Возмущения планетарного масштаба с малыми волновыми числами могут проникать через атмосферу в виде планетарных волн. Возмущения, у которых волновые числа высокие, сохраняют вихревой характер и в основном переносятся со средним потоком. Ветры с востока на запад проявляют характер надежного фильтра планетарных волн, которые не распространяются вверх при наличии ветра с востока на запад. Сильные ветры с запада на восток также задерживают вертикальное распространение планетарных волн. Однако это не происходит вблизи экватора. Кроме того, согласно [11] достаточно сильные ветры с запада на восток при малых волновых числах и малых модах волн Россби могут пропускать планетарные волны в средних широтах. При этом появляются благоприятные условия для распространения планетарных волн в стратосферу и мезосферу в зимнее время. Затухание планетарных волн в области слабых зональных ветров под воздействием радиационных процессов вызывает уменьшение амплитуд волн с высотой. Взаимодействие между вертикально распространяющимися волнами и средним течением решающим образом зависит от профиля среднего зонального ветра. Волны, попадающие на критическую линию, вдоль которой скорость среднего зонального ветра совпадает с их фазовой, не могут пересечь эту линию и поглощаются средним течением [13]. В результате в низких широтах в мезосфере наиболее сильно выражены

возмущения мелкого и среднего масштаба, в то время как в средних и высоких широтах хорошо выражены возмущения всех масштабов [12].

Таким образом, вертикально распространяющиеся планетарные волны, генерируемые в тропосфере, обеспечивают долю стратосферного вихревого переноса тепла и количества движения. По отношению к таким возмущениям стратосфера может рассматриваться как область, свободная от источников возбуждения. [13].

Исследования различных процессов в мезосфере и нижней термосфере позволили выявить отчетливое присутствие временных вариаций с масштабами несколько суток. При этом регистрируются как стационарные, так и перемещающиеся планетарные волны.

#### 1.5 Данные метеорологического бюро Великобритании.

Для сопоставления ситуаций в более низких слоях атмосферы с слоями выше области мезопаузы, использовались данные UKMetOffice, которые представляют собой ежедневные данные на 12LT, полученные путем ассимиляции данных операционных метеорологических наблюдений (например, NOAA спутниковые температурные профили и данные радиозондирования) в модели UK MetOffice [14]. В основе анализа лежит использование техники ассимиляции данных операционных метеорологических наблюдений. В рамках проекта UKMetOfficeUARS (UpperAtmosphereResearchSatellite) ассимиляционная система развивалась на основе новой схемы ассимиляции данных, разрабатываемой для операционного прогнозирования погоды – так называемая аналитическо-коррекционная схема. Модель прогноза в основе ассимиляционной системы

это объединенная UKMetOffice модель, которая способна выполнять расчеты при различных пространственных разрешениях. Для UARS проекта она скомпонована так, что ее вертикальное покрытие простирается от земной поверхности до высот выше стратосферы. Основным продуктом – это ежедневный анализ (12-часовые данные), который получается только при использовании операционных наблюдений. Архив данных содержит поля температуры, геопотенциальной высоты и компонент ветра на стандартных UARS уровнях давления от 1000 гПа до 0,1 гПа, на сетке 2,5° широты на 3,75° долготы. Данные доступны с октября 1991 года до настоящего момента.

Несмотря на то, что данные UKMetOffice предоставляются бесплатно, для работы с ними необходимо получить доступ. Для этого была произведена регистрация на сайте [15] и был отправлен запрос в UKMetOffice с подробным описанием целей и задач, для которых эти данные будут использоваться. Через некоторое время, получив разрешение, появилась возможность использовать имеющиеся в свободном доступе данные.

На протяжении всего времени существования данных UKMetOffice реанализа формат их записи и количество уровней по вертикали несколько раз изменялись. Данные за один срок — 12:00 LT для четырех полей — горизонтальных компонент скорости ветра, температуры и геопотенциальной высоты на 22 изобарических поверхностях записываются в отдельный файл. Принято следующее соглашение о названиях файлов: `ppassm_XXXXX_yYY_mMM_dDD_h12.pp`, например, `ppassm_operh_y02_m08_d29_h12.pp` (данные 29.08.2002 на 12LT). За временной промежуток с 28.09.1991 по 13.03.2006 в файлах содержатся данные для четырех полей на 22 уровнях. Начиная с 28.10.2003, в файлах содержатся данные еще на 3-х дополнительных уровнях, а так же поле вертикальной скорости ветра. Изменился порядок следования широт — от -90° до 90° (для скорости ветра от -88,75° до 88,75°) – первоначально порядок следования широт был обратный. Начиная с 06.09.1994, изменились

некоторые уровни по вертикали, на которых доступны данные. С 03 марта 2006 года, данные представляются в новом виде - результаты ре-анализа поставляются в сжатом виде (внутри файлов используется WGDOS-сжатие). Изменилась также сетка по горизонтали и вертикали. Формат имени файлов ukmo-nwp-strat\_gbl-std\_YYYYMMDDHH\_u\_v\_gph\_t\_w.pp. Кроме этого, начиная с 15 мая 2007 г. добавились уровни и данные о компонентах скорости ветра, геопотенциальной высоте и температуре стали доступны на 30 изобарических поверхностях от 1000 до 0,1 гПа (первоначально данные были доступны до высот порядка 55 км – уровень 0,3 гПа).

Для удобства сопоставления данных с модельными расчетами и/или их ассимиляции в модель, а также для расчета трехмерных распределений вектора потока волновой активности в тропо-стратосфере с использованием данных, необходимо было создать программный комплекс, позволяющий считывать и интерполировать массив данных UKMetOffice на сетку модели MUAM.

Подобная задача, обычно, осложнена изменением формата пространственных сеток и формата записи файлов в процессе накопления огромного массива данных. Данные UK Met Office представляют собой массивы, записанные в бинарном формате. Каждый файл содержит набор данных на трехмерной сетке, привязанной к 12 часам времени по Гринвичу. Массив данных содержит пять полей: компоненты скорости ветра, температура и геопотенциальная высота.

Архив данных UKMetOffice охватывает период с 28.09.1991 по настоящее время. На данном этапе создан программный комплекс по работе с данными до 01.03.2006 включительно. Изменение формата записи и метода архивации файлов произошло 13.03.2006. Изменение формата вертикальной сетки произошло 06.09.1994, при этом порядок и общее количество уровней не изменились. Сетка по горизонтали изменилась дважды - 28.10.2003, а также после 13.03.2006. Изначально пространственная сетка представляла

собой следующее: 22 уровня по высоте от 1000 до 0,32 гПа, 73 узла по широте от  $90^\circ$  до  $-90^\circ$ , 72 узла по широте от  $88,75^\circ$  до  $-88,75^\circ$  для скорости ветра, 96 узлов по долготе. В дальнейшем в связи с изменением количества доступной метеорологической информации и совершенствованием модели UKMetOffice горизонтальное разрешение и количество (а также расположение) уровней по вертикали неоднократно изменялось. Кроме этого, в 2006 г. была введена также новая система архивации данных и разработаны новые программы считывания архивов.

Разработанный программный комплекс позволяет считать данные UK Met Office по заданному пользователем временному интервалу с учетом изменения формата пространственных сеток и формата записи файлов в процессе считывания, в четырехмерные массивы время-долгота-широта-высота. Программное обеспечение для считывания архивов UKMetOffice доступно по ссылке [16].

Для преобразования исходных данных в формат удобный для дальнейшей обработки программными средствами был разработан программный пакет, позволяющий трансформировать степень пространственной дискретизации без потери качества и достоверности информации о состоянии среды. В основу программного пакета положены алгоритмы кусочно-полиномиальной интерполяции. Алгоритм построен с учетом возможности задания пользователем вида дискретизации пространства в выходных массивах данных. На выходе программного комплекса задана сетка модели МСВА: 48 уровней по высоте от 0 до 135 км; 36 узлов по широте от  $-87,5^\circ$  до  $87,5^\circ$  с шагом  $5^\circ$ ; 64 узла по долготе от  $0^\circ$  до  $360^\circ$ , с шагом  $5,625^\circ$ . Программный комплекс формирует на выходе бинарные файлы прямого доступа. Каждая запись в таком файле представляет собой трехмерный массив данных по 5 переменным, привязанный ко дню от начала рассматриваемого пользователем года.

На данном этапе разработанный программный комплекс позволяет работать с данными с 1991 по 2006 год. В настоящее время имеется возможность считывания данные за последние годы (с весны 2006 г., когда была изменена система архивации) на отдельно взятых уровнях. Дальнейшая доработка программы чтения и интерполяции позволит использовать весь массив данных, включая последние годы.

## Глава 2. Измерения и обработка результатов.

### 2.1 Спектрофотометрическая аппаратура.

Важным этапом для наблюдения собственного излучения атмосферы и характеристик атмосферных процессов, является оптический метод мониторинга ВГВ в верхней атмосфере. В основе этого этапа – регистрация вариаций эмиссий верхней атмосферы, характеризуемой очень слабой интенсивностью (10-100 рэлей), и температуры среды, где они возникают.

Открытие достаточно мощных для измерения полос излучения гидроксила (Meinelband) дало заметный толчок в этом методе.[17]

Определение температуры по спектрам излучающих компонентов требует применения спектрофотометрической аппаратуры с высоким спектральным разрешением (0.0001 – 0.1нм). В то же время для регистрации временных вариаций интенсивности эмиссий, обусловленных прохождением через излучающие слои ВГВ (периоды Бранта – Ваясяля для высот мезопаузы около 5.2 мин), необходимо использование светосильной аппаратуры, которая позволила бы осуществлять регистрацию спектров излучения с экспозициями не более 2-3 мин. Чтобы совместить эти два требования для оптических спектральных приборов, необходимо создание специальных спектрофотометрических комплексов, в которых эти требования будут сбалансированы для решения конкретных геофизических задач.

Возбужденный гидроксил верхней атмосферы может служить превосходным термометром, так как по соотношению интенсивностей отдельных линий спектраполос можно рассчитать вращательную



температуру гидроксильного излучения, весьма близкую к температуре окружающего воздуха в излучающем слое [18], а сам слой по данным ракетных измерений, в среднем имеет толщину 10 км и высоту максимума около 87 км (в небольших пределах эти параметры меняются в зависимости от колебательного уровня молекулы ОН и от сезона [19]). Спектр гидроксильных эмиссий представляет собой совокупность инфракрасных колебательно-вращательных полос, которые позволяют определять вращательную температуру молекул ОН.

Методика определения основана на том, что при термодинамическом равновесии возбужденных молекул  $\text{OH}(v', J')$  с окружающими молекулами воздуха их распределение по вращательным состояниям описывается функцией Больцмана. Отсюда, интенсивности колебательно-вращательных линий  $I(v', J' \rightarrow v'', J'')$  определяются как:

$$\begin{aligned}
 I(v', J' \rightarrow v'', J'') &= \\
 &= N(v') A(v', J' \rightarrow v'', J'') \frac{2(2J' + 1)}{Q_v(T_{rot})} \exp\left[-\frac{hc F(J')}{k T_{rot}}\right] \quad (2.1)
 \end{aligned}$$

Где

$v'$  - колебательный уровень исходный

$J'$  - вращательный уровень исходный

$v''$  - колебательный уровень перехода

$J''$  - вращательный уровень перехода

$N(v')$  - населенность колебательного уровня  $v'$ ,

$A(v', J' \rightarrow v'', J'')$  - вероятность колебательно-вращательного перехода  $(v', J' \rightarrow v'', J'')$  [ $s^{-1}$ ],

$h$  – постоянная Планка,

$c$  – скорость света,

$k$  – постоянная Больцмана,

$F(J')$  [ $m^{-1}$ ] – энергия вращательного уровня  $J'$ ,

$Q_v(T_{rot})$  – вращательная сумма по состояниям,

$T_{rot}$  – вращательная температура.

Процедура определения вращательной температуры состоит в построении корреляционного соотношения.

$$\ln \left( \frac{I(v', J' \rightarrow v'', J'')}{2(2J' + 1)A(v', J' \rightarrow v'', J'')} \right) = - \frac{hc}{kT_{rot}} F(J') + C \quad (2.2)$$

$C$  – константа.

Далее, используя метод наименьших квадратов, можно получить значения  $T_{rot}$  [20]. Измеряемое гидроксильное излучение находится в термодинамическом равновесии с окружающей средой и отражает температуру атмосферы на высоте максимума излучающего слоя ОН (около 87 км) [19],[21]. Поскольку типичное время жизни молекулы возбужденного гидроксила значительно меньше 1 мс, можно считать, что гидроксильный слой за время накопления сигнала многие тысячи раз успевает исчезнуть и на короткое время возродиться на новом месте, иначе говоря, за время накопления сигнала он многие тысячи раз меняет свой вертикальный профиль. На быстрых временах изменчивость этого профиля будет

определяться законами атомной и квантовой статистики, а на медленных временах (десятки секунд и более) локализация излучающего гидроксильного слоя определяется в основном двумя вертикальными профилями – общей концентрации молекул  $n(z)$  и концентрации атомарного кислорода  $[O](z)$ ,  $z$ - вертикальная координата [19]. Величины  $n$  и  $[O]$  играют свою роль как при рождении возбужденного гидроксила, так и для его гашения (деактивации столкновениями).

Вращательная температура гидроксила, которая является функцией отношения интенсивностей отдельных линий полос возбужденного гидроксила, имеет два важных информационных преимущества перед интенсивностями отдельных линий, во-первых, как уже указывалось, она практически совпадает с температурой окружающего воздуха и поэтому может быть непосредственно сопоставима с температурой и гидродинамическими характеристиками, получаемыми другими методами; во-вторых, в отличие от интенсивности линий, она не подвержена влиянию прозрачности атмосферы и легкой облачности (при определении температуры исключаются отдельные полосы гидроксила, на структуру которых накладываются полосы поглощения воды и некоторых других молекул). Реально интенсивность линий можно измерять только в абсолютно ясную погоду с хорошей прозрачностью, тогда как число ночей, в которые можно измерять вращательную температуру, значительно больше. Существует еще одна полезная измеряемая характеристика гидроксильного слоя, столь же малочувствительная к легкой облачности и пониженной прозрачности атмосферы. Это отношение интенсивности не двух линий полосы, а двух колебательных полос. Вариации этого отношения определяются в основном столкновительной деактивацией возбужденного гидроксила [22]. Однако деактивация возбужденного гидроксила столкновениями с молекулами кислорода становится несущественной для высоких колебательных уровней гидроксила (по крайней мере, для

колебательных уровней  $\nu \geq 7$ ). Реальными дезактиваторами для этих колебательных уровней становятся только столкновения с молекулярным азотом и кислородом. Поэтому отношение населенностей высоких колебательных уровней гидроксила, отношение интенсивностей соответствующих полос гидроксила, должно меняться согласованно с концентрациями азота и кислорода, то есть с плотностью воздуха на высоте максимума гидроксильного слоя [23]. Из этого следует, что временные ряды, составленные из отношений интенсивностей седьмой и девятой либо восьмой и девятой полос гидроксила, коварирует с плотностью воздуха на высоте максимума гидроксильного слоя. Таким образом, отношение населенностей двух уровней, как и отношение интенсивностей двух полос или интенсивностей двух других полос или «колебательные уровни» связанные с ними [19], могут служить вертикальной координатой  $\zeta$  гидроксильного слоя, монотонно меняющейся с плотностью воздуха при максимуме слоя ( $\zeta$  растет с ростом плотности) и отслеживающей вертикальные перемещения слои.

## 2.2 Измерения помощью SATI (the Spectral Airglow Temperature Imager)

Полосы поглощения гидроксила (ОН), используются спектрофотометрическим комплексом для наблюдения собственного излучения в верхней атмосфере.

Прибор представляет собой пространственный и спектрально-томографический спектрометр Фабри-Перо, в котором эталоном является узкополосный интерференционный фильтр, а детектором – ПЗС-камера. Конфигурация прибора представлена на рисунке 2.1

Он основан на свойстве узкополосного Фабри-перо интерференционного фильтра, пропускающего свет с уменьшением длины волны спектральных линий при увеличении углов падения.

Прибор SATI (theSpectralAirglowTemperatureImager) измеряет спектр эмиссий и вертикальные вариации вращательной температуры в полосах ОН (рис 2.2) и атмосферного кислорода ( $O_2$ ) (рис 2.3), для этого SATI использует два интерференционных фильтра, один с центром в 867.689 нм (в спектральной области атмосферного  $O_2$  (0-1) группа) и второй с центром в 836.813 нм (в спектральной области ОН(Meinelband) (6-2)).

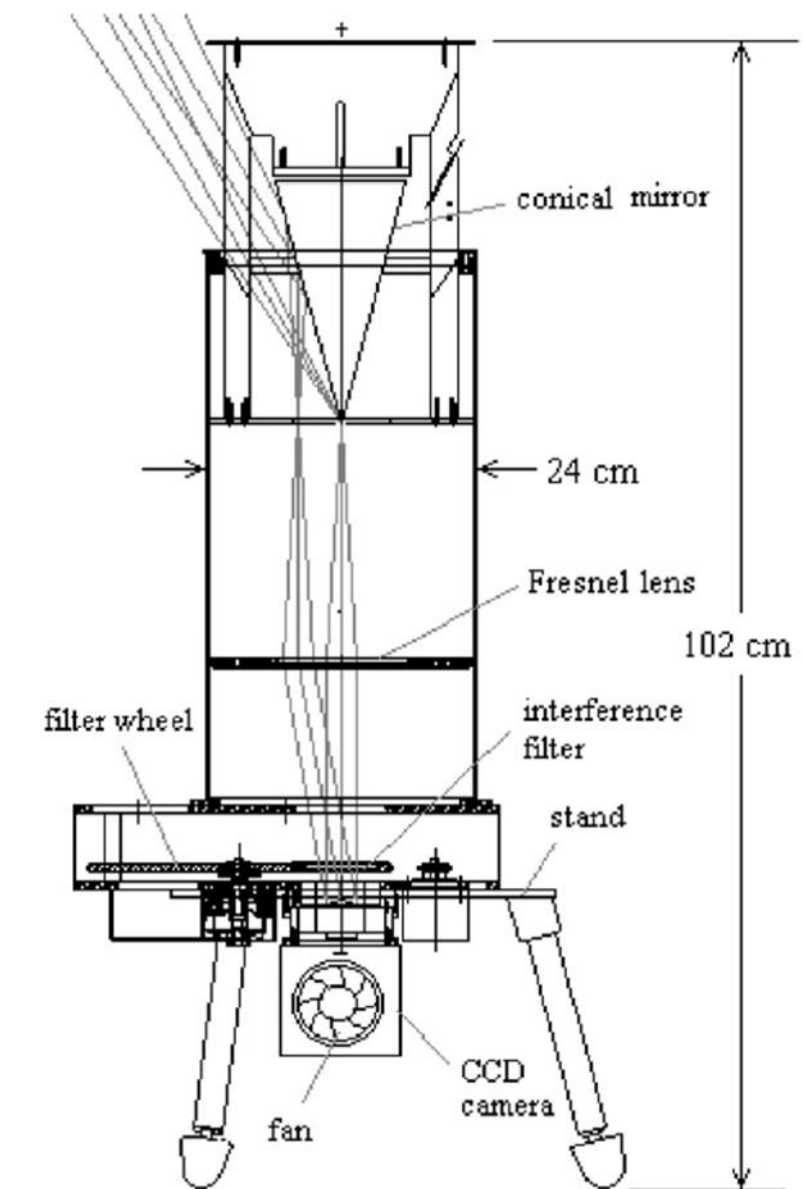


Рисунок 2.1. Конфигурация SATI

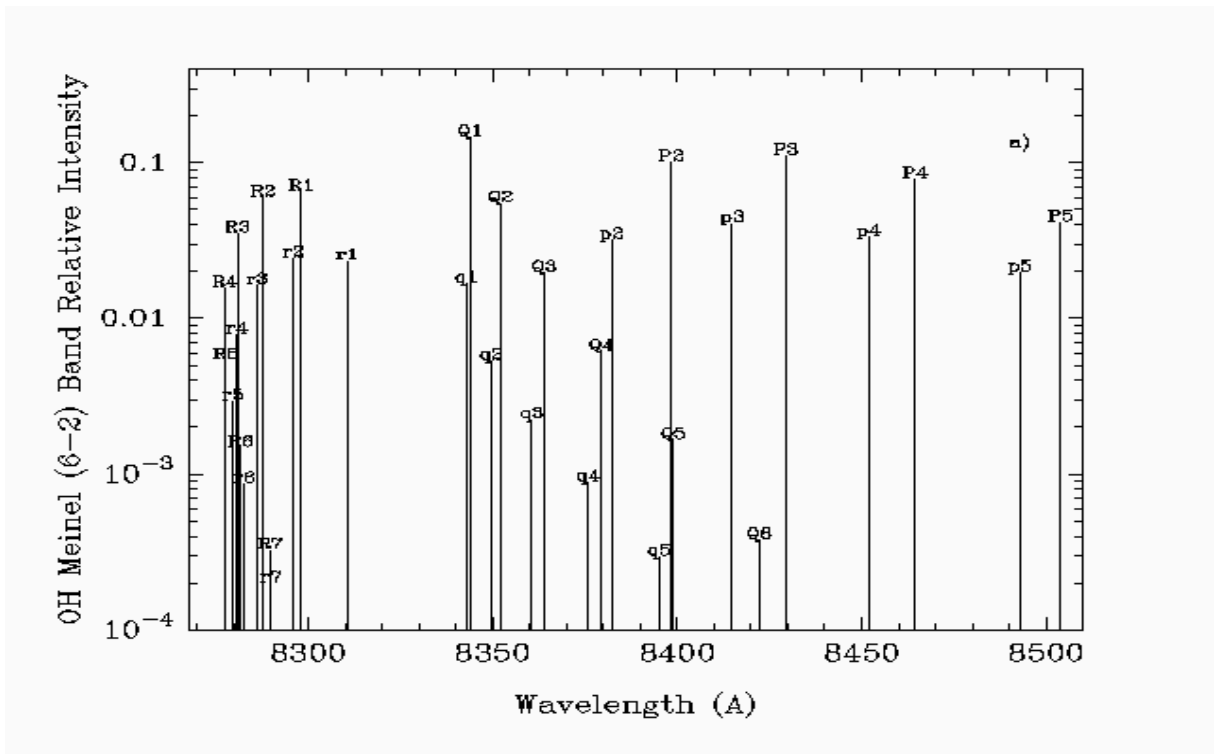


Рисунок 2.2. Полосы излучения гидроксила (Meinelband)

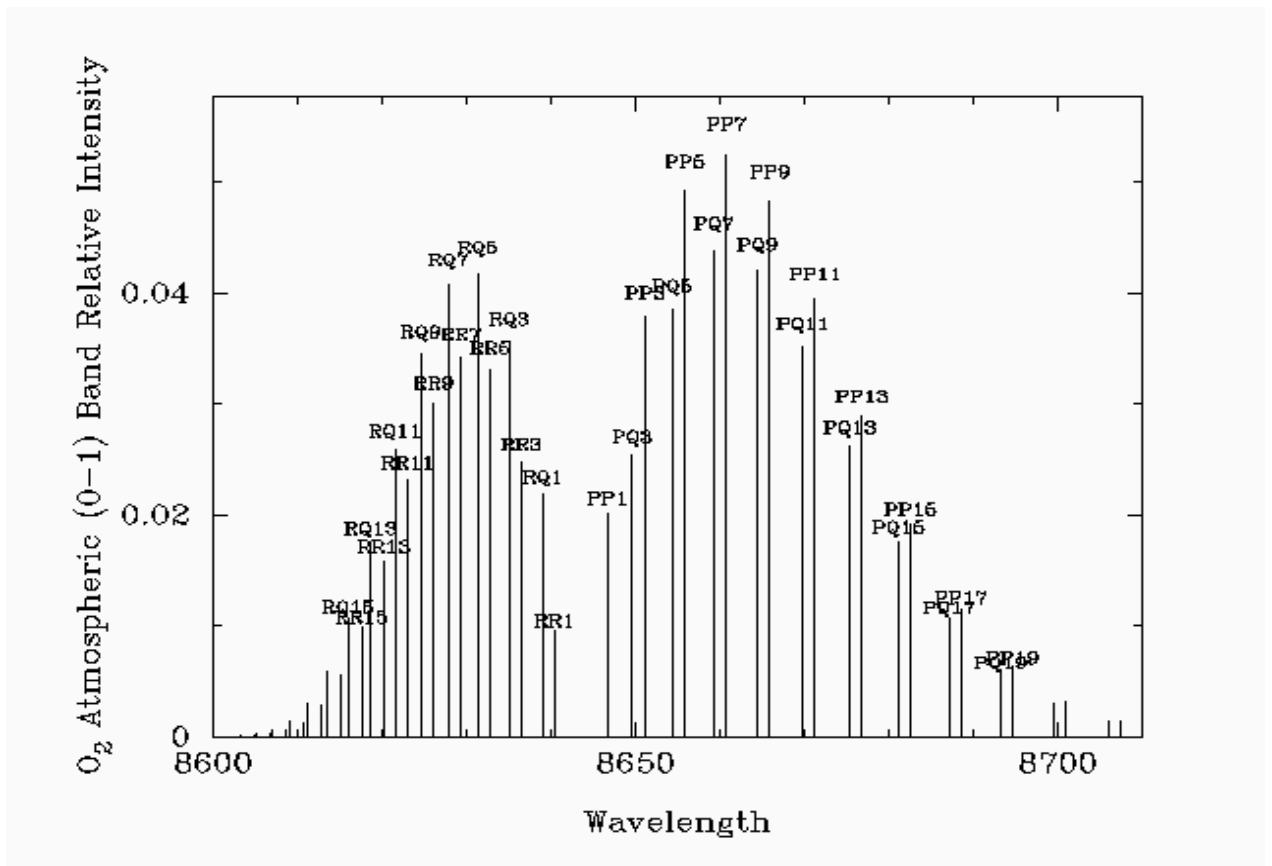


Рисунок 2.3. Полосы излучения атмосферного кислорода

Интерференционный фильтр с центральной частотой  $\lambda_0$ , и имеющий показатель преломления  $\mu$ , передает спектральные линии увеличения длины волны, при уменьшении углов падения по формуле:

$$\sin\theta = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^2}^{1/2} \quad (2.3)$$

Затем спектральные линии на длине волны  $\lambda$ , передает угол  $\theta$ , на ПЗС камеру.

Изображения представляют собой диски, где размерность азимута соответствует азимуту кольца неба, за которым происходит наблюдение, а радиальное распределение изображений содержит спектральное распределение, из которого вращательная температура выводится.

Изображения, полученные от SATI, могут быть проанализированы, для получения средней вращательной температуры и интенсивности выбросов свечения атмосферы со всего небосвода; это обеспечивает хороший контроль за поведением вращательной температурой и интенсивностью выбросов в течение длительных периодов времени, или, путем деления изображения в различных секторах, получение информации о вращательной температуре и интенсивности выбросов каждого сектора небесного кольца, от которого горизонтальная скорость возмущения может быть определена.

На рисунке 2.4 показано типичная картинка, полученная с помощью прибора SATI с использованием фильтра в полосах поглощения атмосферного кислорода ( $O_2$ ). На рисунке 2.5 изображение получено с использованием фильтра в полосах поглощения гидроксидов ( $OH$ ).



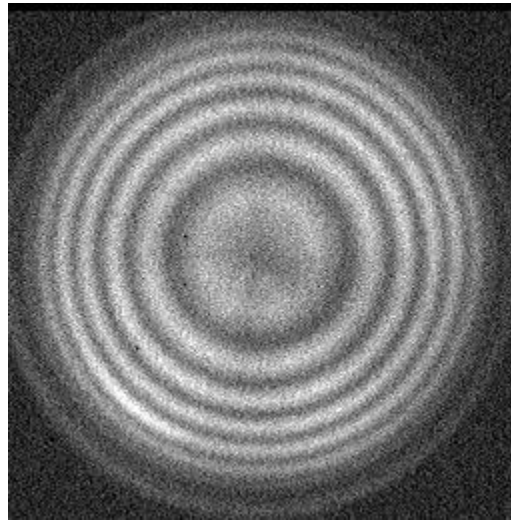


Рисунок 2.4. Изображения полученные с помощью SATI, используется фильтр с центром в полосе поглощения кислорода ( $O_2$ )

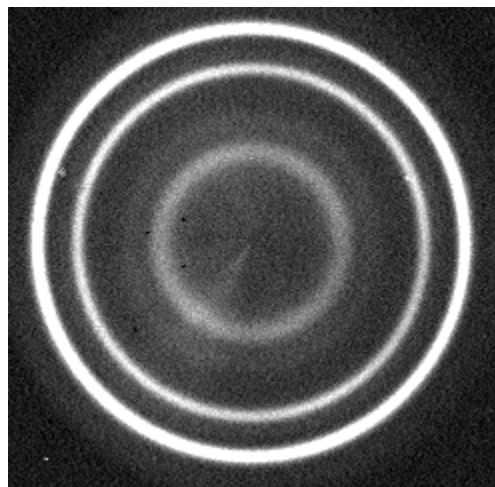


Рисунок 2.5.Изображение полученное с помощью SATI, используется фильтр с центром в полосе поглощения гидроксидов(OH)

### 2.3 Обработка результатов измерений.

Данные были получены из ДТОО «Института ионосферы» города Алма-Ата. Прибор SATI установлен в районе г. Алма-Аты на территории института, на радио полигоне «Орбита».

Данные представляют собой временной массив для интенсивности ночного свечения гидроксила и вращательной температуры гидроксильного спектра и спектра атмосферного кислорода. Измерения проводятся каждые три минуты с помощью спектрофотометрического прибора SATI, однако вследствие зависимости методики от погодных условий и состояния атмосферы, непрерывно проводить измерения невозможно. Массив данных обладает привязкой к времени измерения и измерение проводится в ночное время суток, а так же производится усреднение по всем каналам прибора.

Было проведено осреднение данных для каждой ночи, в которую проводилось измерение, с целью фильтрации ненужных данных и возможностью нахождения характеристик планетарных волн.

В течение отдельных суток измерения не проводились, вследствие внешних погодных условий, не позволяющих использовать спектрофотометрическую аппаратуру, поэтому временной ряд содержит в себе пробелы, которые заполняются пакетами программ, написанных на языке Fortran.

## 2.4 Фурье преобразование данных.

В ситуациях, где данные не могут быть получены равными временными интервалами, например, когда происходит выпадение данных. Встречается в науках, где проводят различные наблюдения, и наблюдатель не может полностью контролировать время наблюдений.

Есть несколько способов создать из неравномерного ряда данных равномерный. Интерполяция является одним из таких способов: сетка кладется равномерно на ряд данных и на ней производится интерполяция, после чего можно применить методы Фурье анализа. В случае выпадения данных, интерполяцию также можно применять. Если существует большой кусок недостающих данных, то его можно заменить нулевыми значениями или каким-либо фиксированным значением (последняя точка). Однако такие методы на практике работают плохо.

Существует метод спектрального анализа, для неравномерно дискретизированных данных разработанных Ломбом и Скарглем. В методе Ломба-Скаргла данные оцениваются по времени, которое можно непосредственно измерить.

Предположим, что существует ряд из  $N$  данных:

$$h_i \equiv h(t_i), \quad i = 1, \dots, N \tag{2.4}$$

$h$  – измерение

$t$  – время

Для начала найдем математическое ожидание и дисперсию по обычным формулам:

$$\bar{h} = \frac{1}{N} \sum_1^N h_i \quad (2.5)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_1^N (h_i - \bar{h})^2 \quad (2.6)$$

Теперь, нормированная периодограмма Ломба-Скаргла (спектральная мощность является функцией угловой частоты  $\omega \equiv 2\pi a > 0$ ), определяется так:

$$P_N(\omega) \equiv \frac{1}{\sigma^2} \left( \frac{[\sum_j (h_j - \bar{h}) \cos \omega(t_j - \tau)]^2}{\sum_j \cos^2 \omega(t_j - \tau)} + \frac{[\sum_j (h_j - \bar{h}) \sin \omega(t_j - \tau)]^2}{\sum_j \sin^2 \omega(t_j - \tau)} \right) \quad (2.7)$$

Здесь постоянная  $\tau$  определяется соотношением:

$$\tan(2\omega\tau) = \frac{\sum_j \sin 2\omega t_j}{\sum_j \cos 2\omega t_j} \quad (2.8)$$

Постоянная  $\tau$  своего рода компенсирующая константа, которая делает распределение  $P_N(\omega)$  независимым от сдвигов по времени. Автор статьи [24], показывает, что выбор этой компенсирующей константы имеет более глубокий эффект. Уравнение (2.4) становится идентичным уравнению, которое можно было бы получить, если оценить гармоническое содержание системы данных при определенной частоте  $\omega$ , методом наименьших квадратов, соответствующее модели:

$$h(t) = A \cos \omega t + B \sin \omega t \quad (2.9)$$

Благодаря этому, метод дает результаты, превосходящие обычный Фурье анализ: данные рассматриваются для каждой точки, а не за интервал времени. В случае последнего может получаться серьезная ошибка в расчетах.

Очень распространенным случаем является то, что измеренные данные  $h_i$  являются суммой периодических сигналов и независимого (белого) Гауссовского шума. Если пытаться определить наличие или отсутствие этого периодического сигнала, то должна быть возможность дать количественный ответ на вопрос «Насколько важен пик в спектре  $P_N(\omega)$ ?». В этом вопросе, нулевой гипотезой является то, что значения данных представляют собой независимые гауссовы случайные величины. Особенность нормированной

периодограммы Ломба-Скаргла–жизнеспособность нулевой гипотезы можно однозначно увидеть.

Слово «нормированная» означает, что  $\sigma^2$  находится в знаменателе выражения (2.4). Автор статьи [25] показывает, что при таком нормировании, в любой заданной частоте  $\omega$  и в случае нулевой гипотезы спектр мощности  $P_N(\omega)$  имеет экспоненциальную вероятность распределения с единичным средним. То есть вероятность того что  $P_N(\omega)$  будет между  $z$  и  $z + dz$  является  $e^{-z} dz$ . Отсюда следует, что если найти некую величину  $M$  независимых частот, то вероятность что не будет значений больше  $z$  получается  $(1 - e^{-z})^M$ .

Так существует вероятность ложной тревоги нулевой гипотезы:

$$P(> z) = 1 - (1 - e^{-z})^M \quad (2.10)$$

то, есть уровень значимости любого пика в распределения  $P_N(\omega)$ . который точно можно увидеть.

Чтобы найти значимость, нужно знать  $M$ . В общем  $M$  зависит от выбора количества частот, количества данных  $N$ , и от интервала между ними. Получается, что  $M$  почти не отличается от  $N$ , когда данные разнесены примерно одинаково и когда набор частот лежит в интервале от 0 до частоты Найквиста.  $M$  также не сильно отличается, если шаг между данными является произвольным. В случае, когда частота возрастает выше частоты Найквиста,  $M$  пропорционально растет. В случае, если три точки данных располагаются очень близко друг к другу,  $M$  сильно отличается и уменьшается примерно в три раза. [26]

$$f_c = \frac{1}{2\Delta} \quad (2.11)$$

$\Delta$  - величина обратная временному интервалу, частота дискретизации

Соответствующая программа, написанная на языке «Fortran», считает эффективное значение  $M$ . На основе всего вышеупомянутого.

## Глава 3. Результаты.

### 3.1 Данные метеорологического бюро Великобритании. Ситуация за январь-март 2016 года.

Прежде чем приступить к анализу изменчивости ВГВ, посредством изменений в полученной вращательной температуре и интенсивности ночного свечения гидроксила, необходимо иметь представление о событиях внезапных стратосферных потеплений зимой 2015-2016 года.

Внезапным стратосферным потеплением является сильное и внезапное повышение температуры «взрывного характера» в полярной и субполярной стратосфере зимой, иногда на  $50^{\circ}$  и более в течение нескольких (порядка десяти) суток. При этом меняется знак меридионального градиента температуры над полушарием, формируется стратосферный антициклон, и общий перенос воздуха меняется с западного на восточный. ВСП возникает в верхней стратосфере, в слоях, располагающихся над уровнем около 24 км, и затем распространяется также и на нижнюю стратосферу. Возвращение к нормальному зимнему режиму протекает медленнее, чем развитие потепления. В последние годы отмечается повышение температуры на высотах значительно превышающие высоты, обозначенные Всемирной метеорологической организацией. Часто, при ограничении высоты в 30-40 км, можно просмотреть ВСП, которое развивается выше. Так как развитие событий ВСП существенным образом отражается на всех процессах, имеющих место быть в средней атмосфере и не только, анализ межсезонной изменчивости ВГВ проводился согласно датам наступления и развития ВСП зимой 2015-2016 года.



На рисунках 3.1 отображена ситуация происходящая в атмосфере до 80 км по данным метеорологического бюро Великобритании за январь-март 2016 года.

Из анализа полученной картины можно выявить два внезапных стратосферных потепления происходящих в феврале и в марте. Значительное повышение температуры на высоте 35-40 км начинается примерно 6 февраля (нижняя панель рисунка 3.1). Отклонение от средней температуры достигает 70 градусов Кельвина. Также в это же время изменяется направление среднего зонального потока (средняя панель рисунка 3.1). Таким образом ВСП начинается 6 февраля и продолжается 6 дней.

На рисунках 3.2 и 3.3 представлены зональный и меридиональный ветра соответственно непосредственно над местом, в котором проводились измерения. Можно отметить изменения их направления во время событий ВСП, описанных выше. Однако, обращение обоих компонент ветра происходит раньше на пару дней, что связано с другими координатами, на которых отображена картина изменений в стратосфере.

В начале марта также можно наблюдать развитие внезапного стратосферного потепления. Это уже так называемое финальное потепление, после которого происходит весенняя перестройка атмосферы. Развитие ВСП начинается 5 марта и длится до 11 марта.

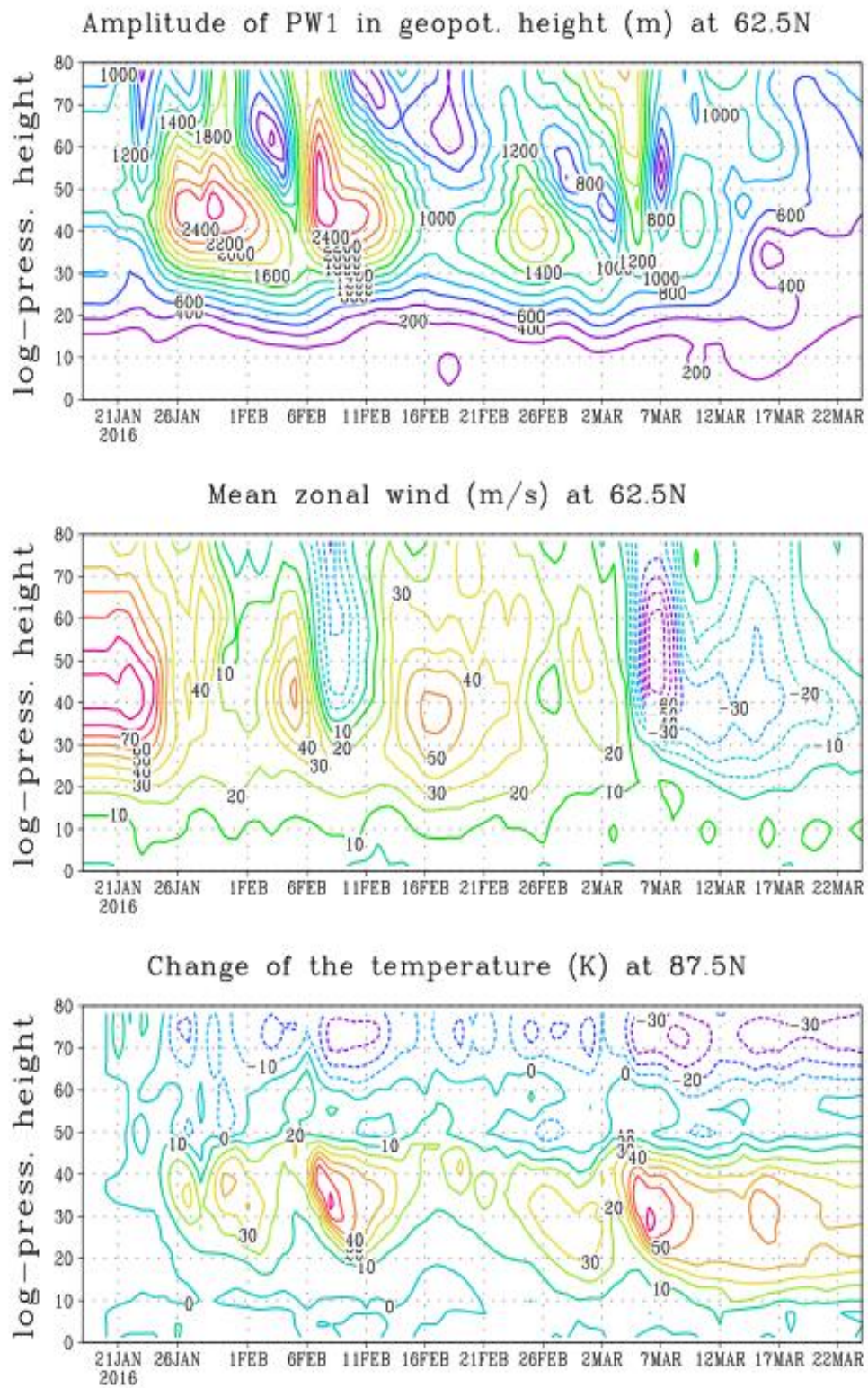


Рисунок 3.1. Верхняя панель: амплитуда зональной гармонике с волновым числом  $m = 1$  в поле геопотенциальной высоты на широте 62.5с.ш.;средняя панель: средний зональный ветер на широте 62.5 с.ш.;нижняя панель отклонение температуры от климатической на широте 87.5 с.ш.. По данным УКМОза январь-март 2016 года.

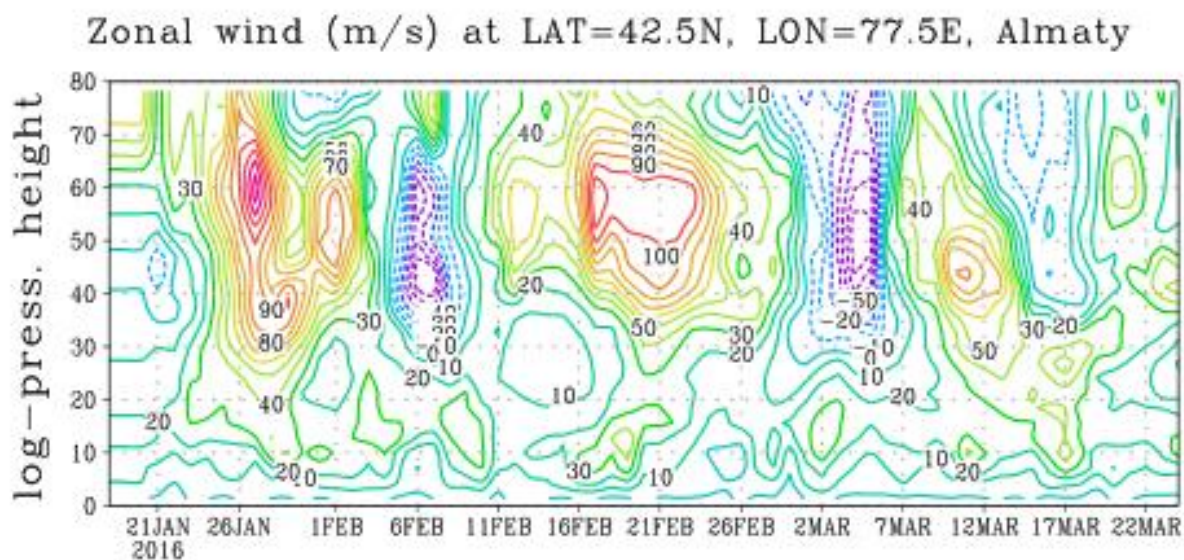


Рисунок 3.2. Зональный ветер на широте 42.5 N и долготе 77.5 E (над станцией Алматы).  
По данным УКМО за январь-март 2016 года.

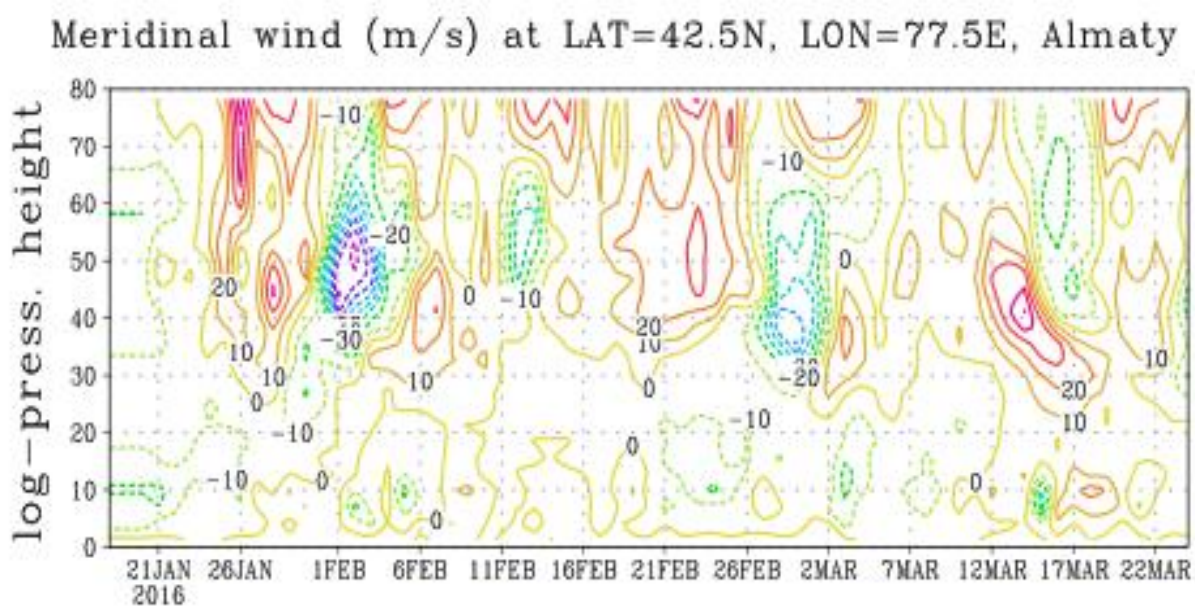


Рисунок 3.3. Меридиональный ветер на широте 42.5 N и долготе 77.5 E (над станцией Алматы). По данным УКМО за январь-март 2016.

### 3.2 Выводы.

В приложении А представлены спектры вращательной температуры и интенсивности ночного свечения гидроксила, полученные по данным спектрофотометра SAT, расположенном на территории ДТОО «Института ионосферы» города Алма-Ата и по средством соответствующей обработки пакетами программ. Анализируя текущую ситуацию с учетом развития событий ВСП, полученную по данным УКМО, можно выявить зависимость амплитуды от текущего состояния атмосферы и в последующем ожидать или прогнозировать определенные изменения в поведении ВГВ.

В момент наступления ВСП наблюдается наиболее заметное отклонение интенсивности ночного свечения гидроксила и вращательной температуры от осредненных спектров полученных отдельно для февраля и марта (рисунок 1, 2, 9 и 10 соответственно).

В феврале амплитуды спектров эмиссии отличаются от амплитуд в марте более чем на порядок. Амплитудами спектров вращательной температуры в феврале и марте очень похожи, отличаются лишь амплитуды низкочастотных волн. В марте рост амплитуд не столь существенный.

Рассматривая отдельно амплитуды спектров интенсивности ночного свечения гидроксила и вращательной температуры до наступления ВСП в феврале и марте (рисунки 3, 4, 11 и 12 соответственно), следует отметить амплитуды спектров вращательной температуры у низкочастотных волн. Эти амплитуда больше осредненных в два раза. В остальном отличий от осредненных данных нет.

Анализируя поведение ВГВ во время ВСП, обращает на себя внимание график вращательной температуры в феврале и марте (рисунок 6 и 16

соответственно), который становится более «разряженным». Изменения наблюдаются и в области высокочастотных и низкочастотных волн.

По окончании ВСП в феврале амплитуды и спектров интенсивности ночного свечения эмиссии гидроксила и вращательной температуры (рисунки 7 и 8 соответственно) возвращаются к состоянию до наступления ВСП.

В марте ситуация более сложная, так как ВСП наблюдаемое в этом месяце – финальное. Следовательно, атмосфера уже не возвращается к зимнему состоянию, начинается весенняя перестройка. Опять же до наступления ВСП измерения проводились нерегулярно, поэтому достоверного рисунка, демонстрирующего спектры эмиссии и температуры нет. Можно лишь отметить, что во время развития ВСП изменения спектра амплитуд также заметны и очевидны как и в феврале.

Поскольку методика измерений зависит от погодных условий и в течении отдельных промежутков времени использовать спектрофотометрическую аппаратуру нельзя и в следствии того, что ряд данных представленный для анализа не достаточно полон для выявления более точных зависимостей – невозможно составить из этого точную картину происходящего, однако такой метод достаточно хорошо описывает состояние атмосферы на высотах выше чем 80 км.

### 3.3 Заключение

Была проанализирована ситуация с учетом развития событий ВСП, полученная по данным УКМО, зависимость амплитуды от текущего состояния атмосферы и в последующем ожидать или прогнозировать определенные изменения в поведении ВГВ.

Основным результатом является то, что во время стратосферных потеплений (ВСП) наблюдается резкое изменение спектрального состава ВГВ – усиливаются относительно короткопериодные волны  $T = 30-60$  мин, а вот низкочастотные заметно ослабевают. Скорее всего этот эффект обусловлен изменением среднего потока и фильтрацией долгопериодных волн, которые имеют относительно низкие горизонтальные фазовые скорости. Однако это заключение носит предварительный характер. Для окончательных выводов необходимо анализировать ВГВ в различных секторах, оценивать азимуты распространения, фазовые скорости. Данные, получаемые с помощью аппаратуры SATI позволяют такие задачи решать,

В дальнейшем, при более полном ряде наблюдений не за один год, а за несколько лет, возможно отследить межгодовую изменчивость ВГВ, а так же выявить определенные закономерности в поведении волн во время и вне развития событий ВСП.

## Используемая литература.

1. Гаврильева Г.А., Аммосов П.П. Наблюдения распространения гравитационных волн в инфракрасном свечении всего неба // Геомагнетизм и аэрономия. 2001. Т. 41, № 3. С. 375-381
2. Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю., Излучение верхней атмосферы– индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС, 2006. 741 с. 400
3. Hines C.O. A possible source of waves in noctilucent clouds // J. Atmos. Sci. 1968. Vol. 25, N 5. P. 937-942
4. Hines C.O. The upper atmosphere in motion. Worcester, Massachusetts: Neffernan Press, 1974. P. 1024
5. Гаврилов Н.М.  
Тепловой эффект внутренних гравитационных волн в верхней атмосфере // Изв. АН СССР Физика атмосферы и океана. 1974. Т. 10, №1. С.83-84
6. Чунчунзов Е.П. Об энергетических характеристиках внутренних гравитационных волн, наблюдаемых по гидроксильной эмиссии мезопаузы // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1978. Т.14, № 10. С. 1094-1097
7. Vincent R.A. Gravity wave motions in the mesosphere // J. Atmos. Terr. Phys. 1984. Vol. 46, N 2. P. 119-128
8. Gavrilov N.M. Internal gravity waves in the mesopause region: hydrodynamical sources and climatological patterns // Adv. Space Res. 1992. Vol. 12, N 10. P. 113-121

9. Эккарт К. Гидродинамика океана и атмосферы. М.: Изд-во Иностранной литературы, 1963. С. 328
10. Красовский В.И., Потапов Б.П., Семенов А.И., Соболев В.Г., Шагаев М.М., Шефов Н.Н. Внутренние гравитационные волны вблизи мезопаузы. 1. Результаты исследований гидроксильной эмиссии // Полярные сияния и свечение ночного неба / Под ред. Ю.И. Гальперина. М.: Сов. Радио, 1978. № 26. С. 5-29.
11. Dickinson R.E. Planetary waves and large-scale disturbances in the stratosphere and mesosphere // Meteorological and chemical factors in D – region aeronomy – record of the third aeronomy conference (USA, Illinois, September 23-26, 1968) // ed. C.F. Sechrist. Urbana: Univ. Illinois, 1969. P. 80-87
12. Гайгеров С.С. Исследование синоптических процессов в высоких слоях атмосферы / Под ред. В.А. Бугаева. Л.: Гидрометеиздат, 1973. С. 252
13. Холтон Дж. Р. Динамическая метеорология стратосферы и мезосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1979. С. 224
14. Swinbank R., O'Neill A. A stratosphere-troposphere assimilation system // Mon. Weather Rev. 1994 V. 122.- P. 686-702.
15. <http://badc.nerc.ac.uk/browse/badc/ukmo-assim>
16. <http://badc.nerc.ac.uk/help/software/xconv/index.html#unpack>.
17. Meinel A.B. The near-infrared spectrum of the night sky and aurorae // Publ. Astron. Soc. Pac. 1948. Vol. 60, N 337. P. 373-378
18. Шефов Н.Н. Об определении вращательной температуры полос ОН // Спектральные, электрофотометрические и радиолокационные исследования полярных сияний свечения ночного неба / Под ред. В.И. Красовского. М.: Изд-во АН СССР, 1961. № 5. С. 5-9.



19. Шефов Н.Н., Семенов А.И., Юрченко О.Т. Эмпирическая модель вариаций эмиссии атомарного кислорода 630 нм в ночное время. 1. Интенсивность // Геомагнетизм и аэрномия. 2006. Т. 46, № 2. С. 250-260
20. Перминов В.И., Семенов А.И., Медведева И.В., Перцев Н.Н. Изменчивость температуры в области мезопаузы по наблюдениям гидроксильного излучения на средних широтах // Геомагнетизм и Аэрномия. 2014. Т. 54. № 2. С. 246-256
21. Перминов В.И., Семенов А.И., Шефов Н.Н. О вращательной температуре гидроксильной эмиссии // Геомагнетизм и аэрномия. 2007. Т. 47. № 6. С. 798-805
22. Перминов В.И., Семенов А.И., Шефов Н.Н., Дезактивация колебательных состояний молекул гидроксила атомарным и молекулярным кислородом в области мезопаузы // Геомагнетизм и аэрномия. 1998. Т. 38, № 6. С. 100-105
23. Pertsev N. N., Perminov V. I., Lowe R. P., DeSerranno R., Effect of Vertical Motion of the hydroxyl Nightglow Layer on the observed variation of rotational temperature. Intern. J. Geomag. Aeron. 1999. V.1. N.3, P. 259-265
24. Lomb N. R., Astrophysics and Space Science. 1976. 39, P. 447
25. Scargle J.D., Astrophysics. 1982 J. 302, P. 757
26. Horne J.H., Baliunas S.L., Astrophysics. 1986. J. 302. P. 757

## Приложения

Приложение А. Спектры вращательной температуры и интенсивности  
ночного свечения гидроксила.

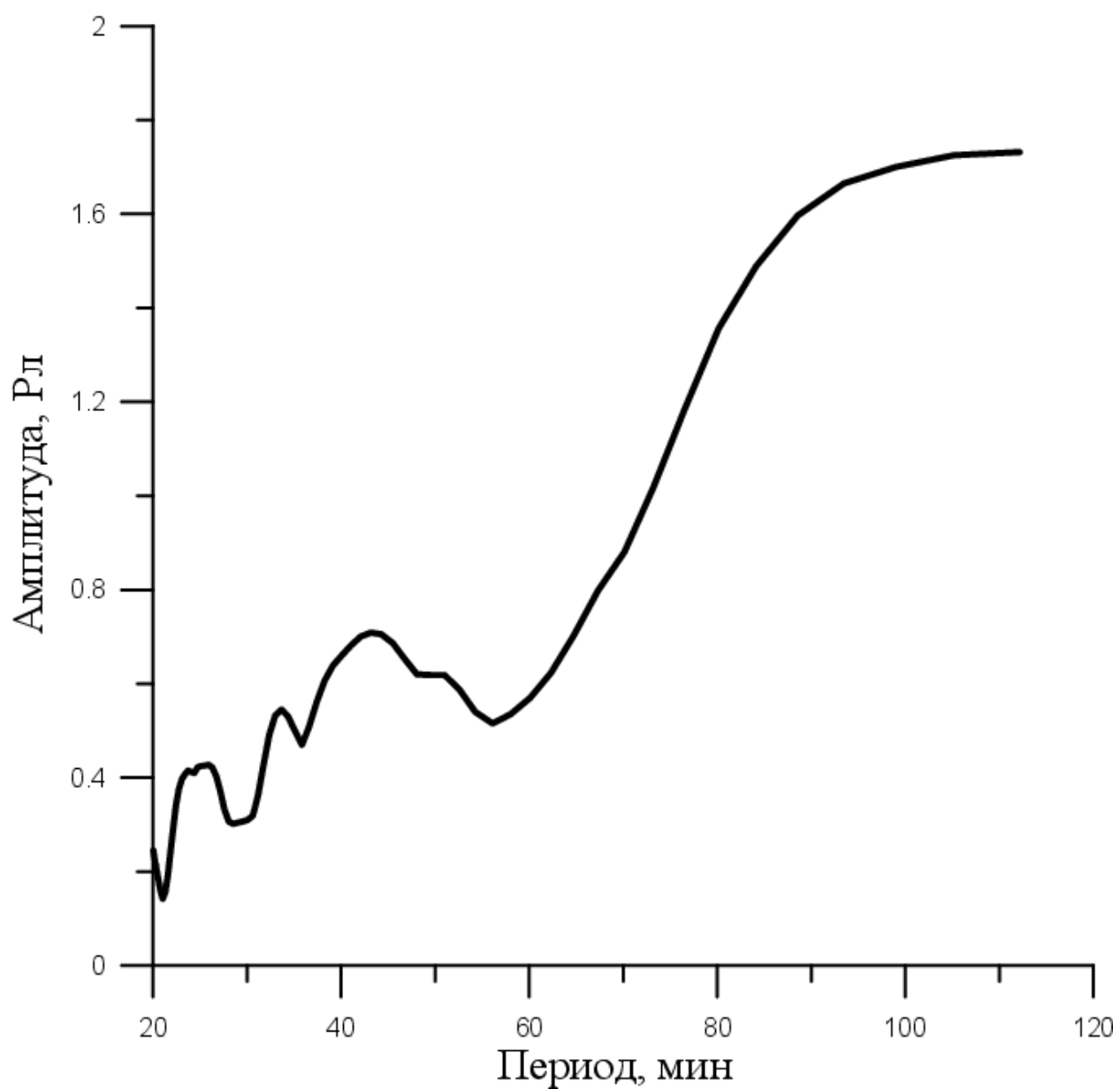


Рисунок А.1. Осредненный спектр интенсивности ночного свечения гидроксила.  
Февраль.

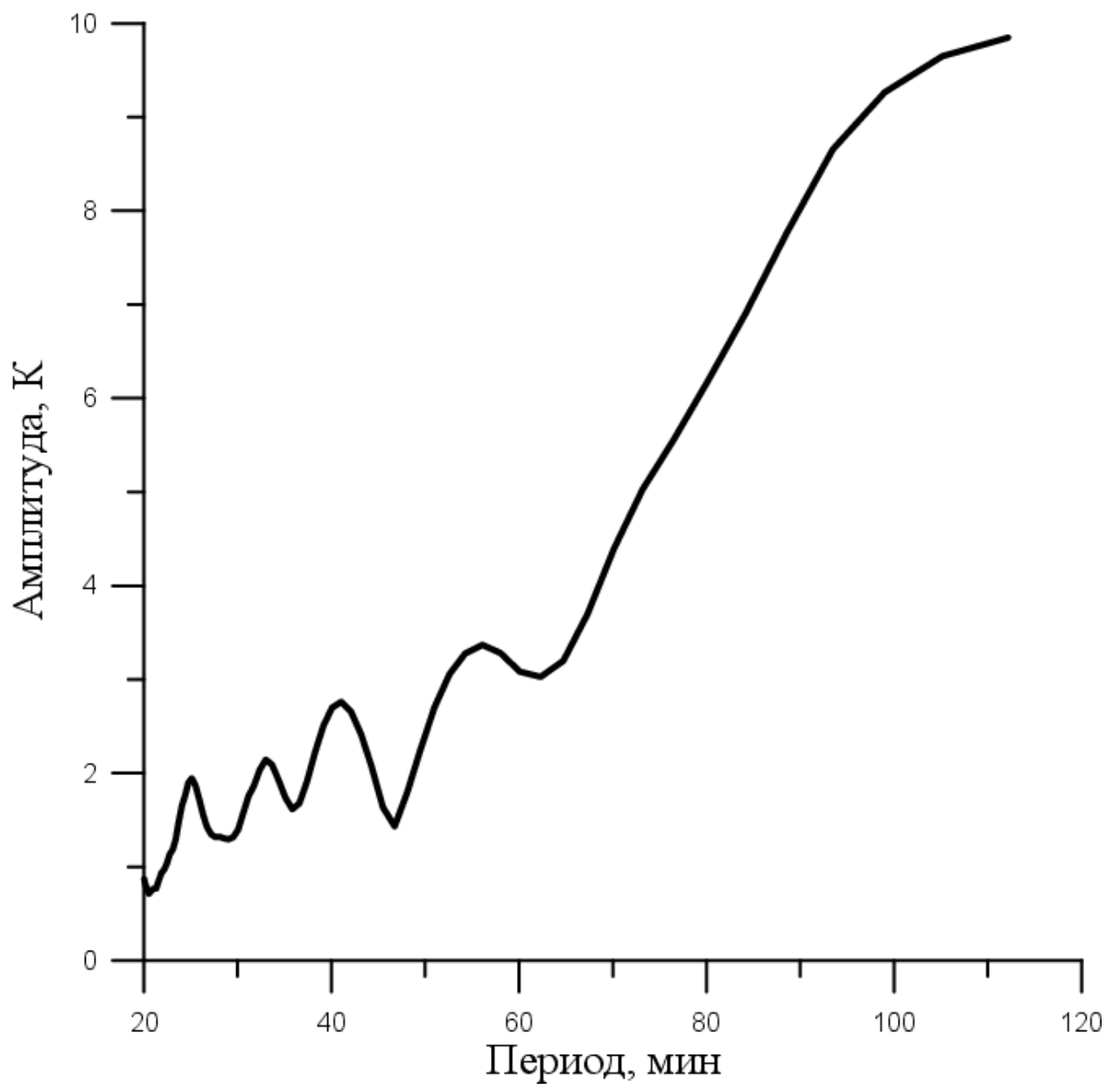


Рисунок А.2. Осредненный спектр вращательной температуры.  
Февраль.

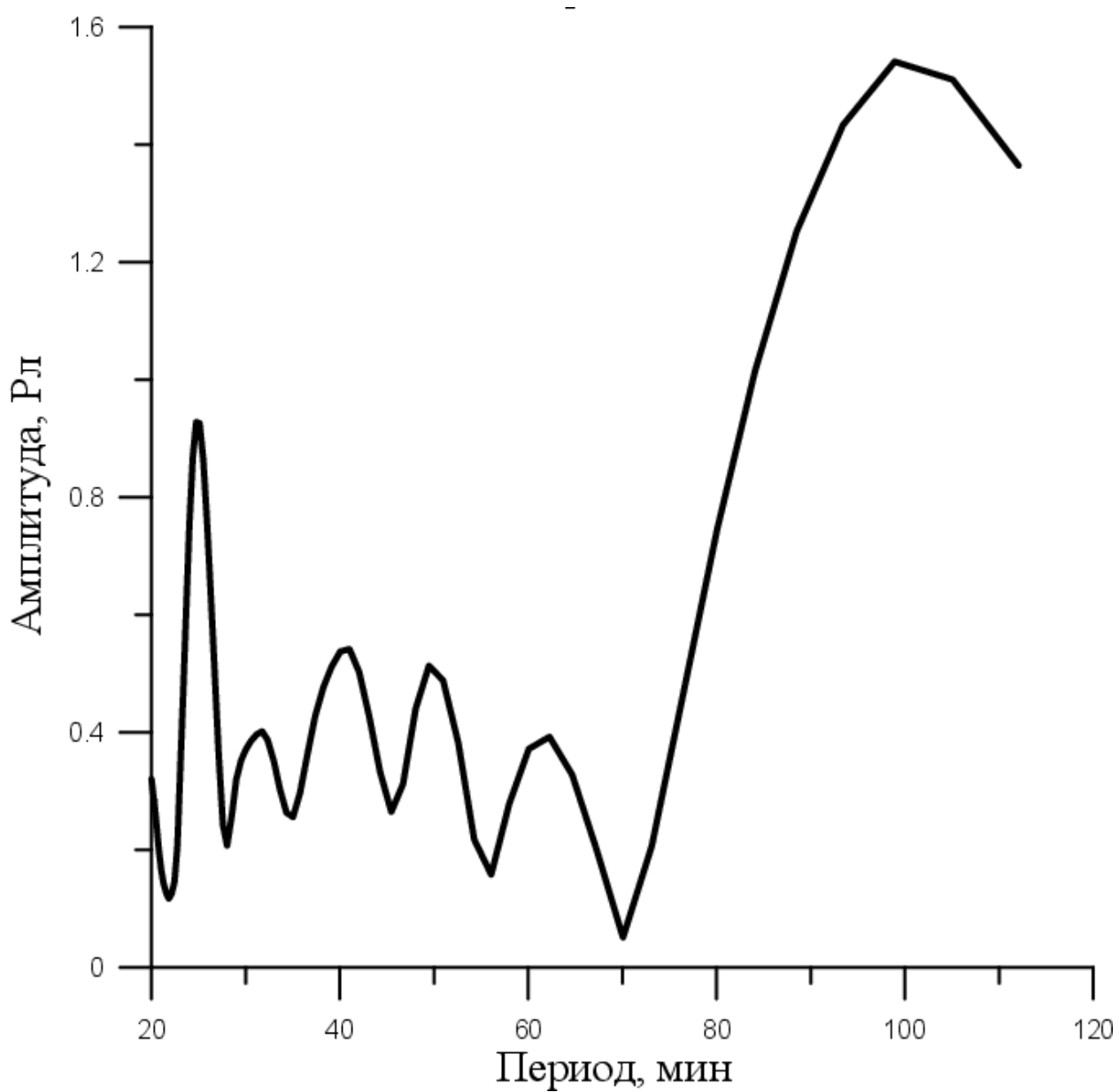


Рисунок А.3. Спектр интенсивности ночного свечения гидроксила.  
2 февраля – до событий ВСП.

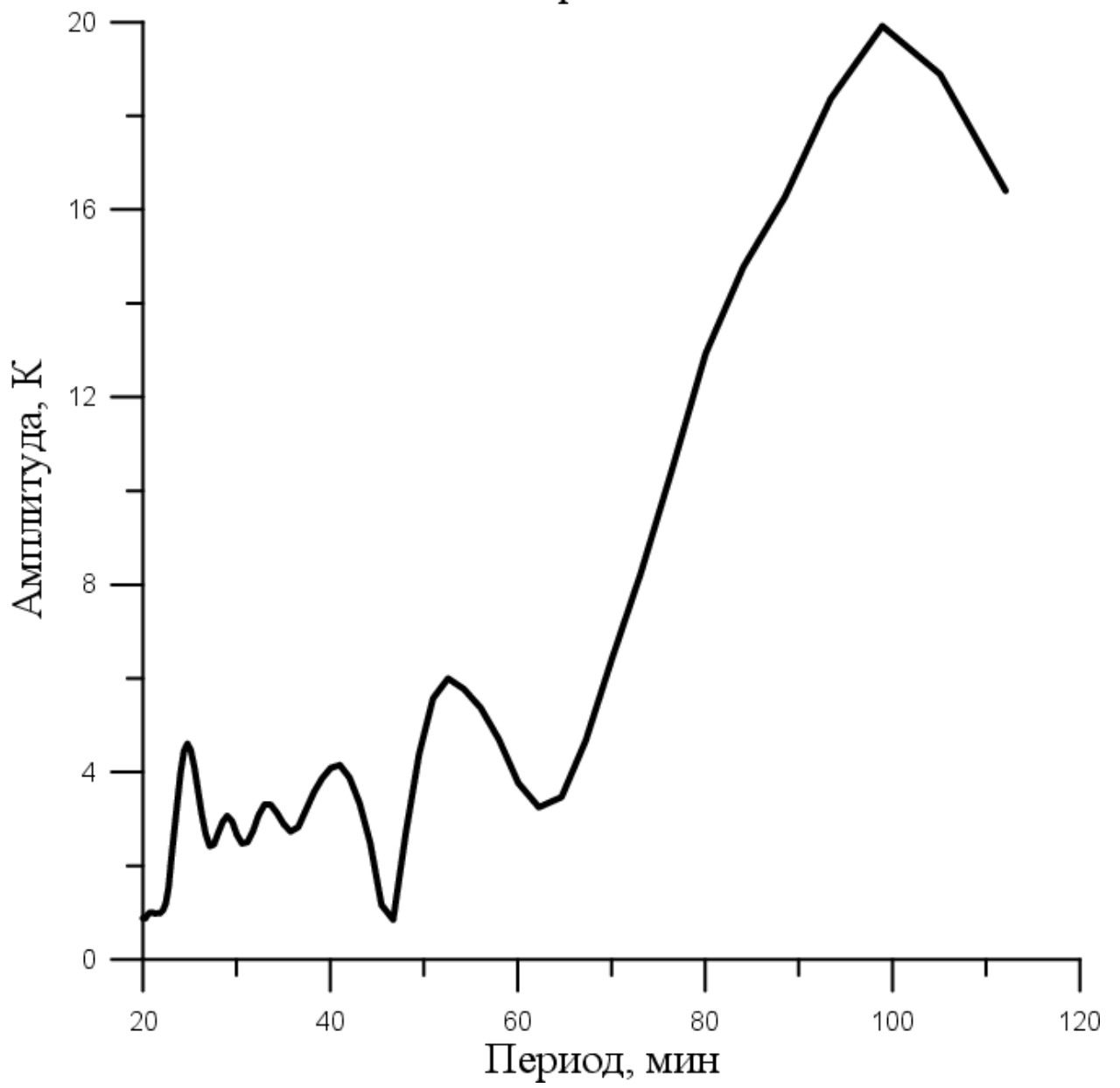


Рисунок А.4. Спектр вращательной температуры.

2 февраля – до событий ВСП.

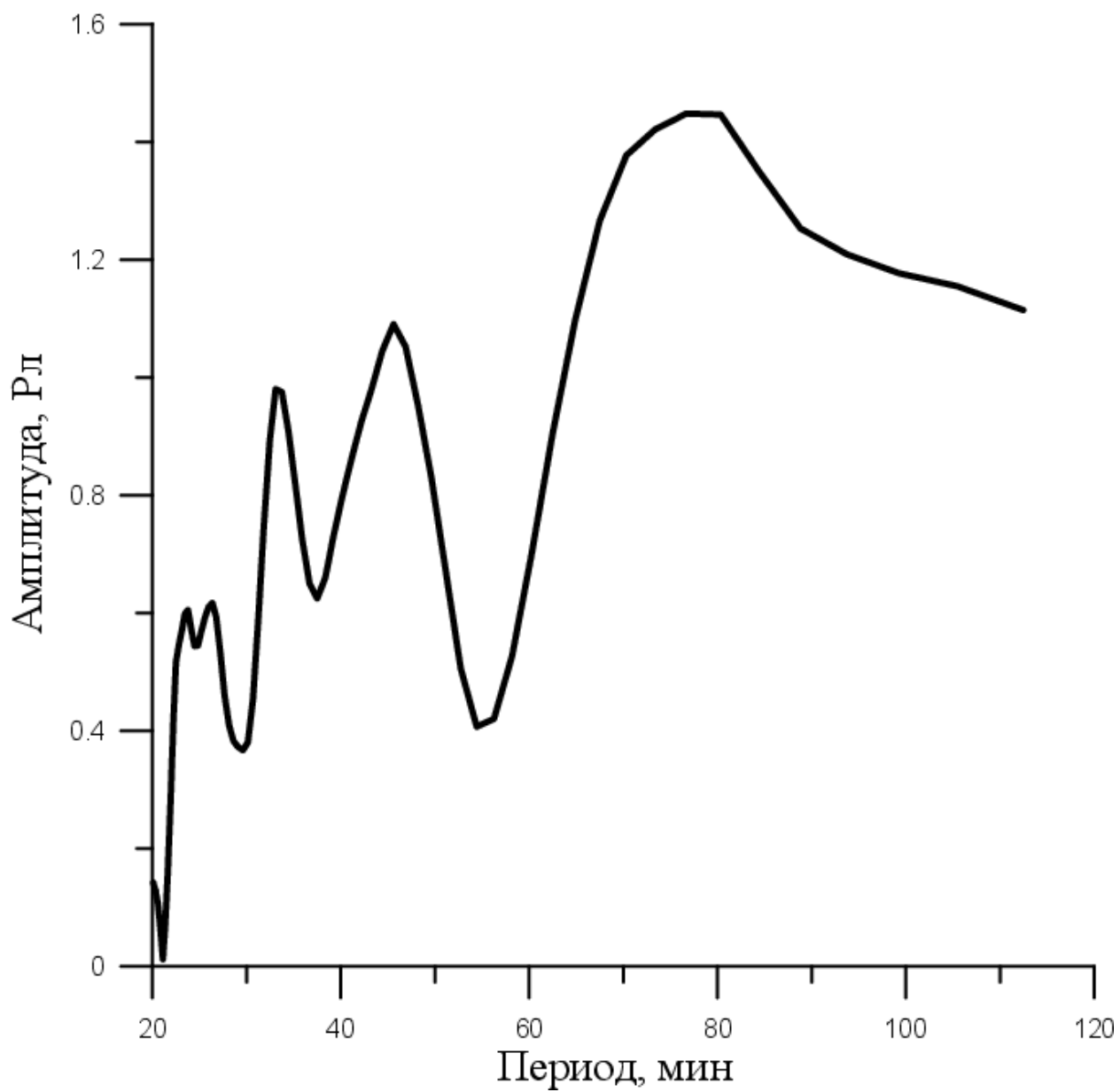


Рисунок А.5. Спектр интенсивности ночного свечения гидроксила.  
6 февраля – во время события ВСП.

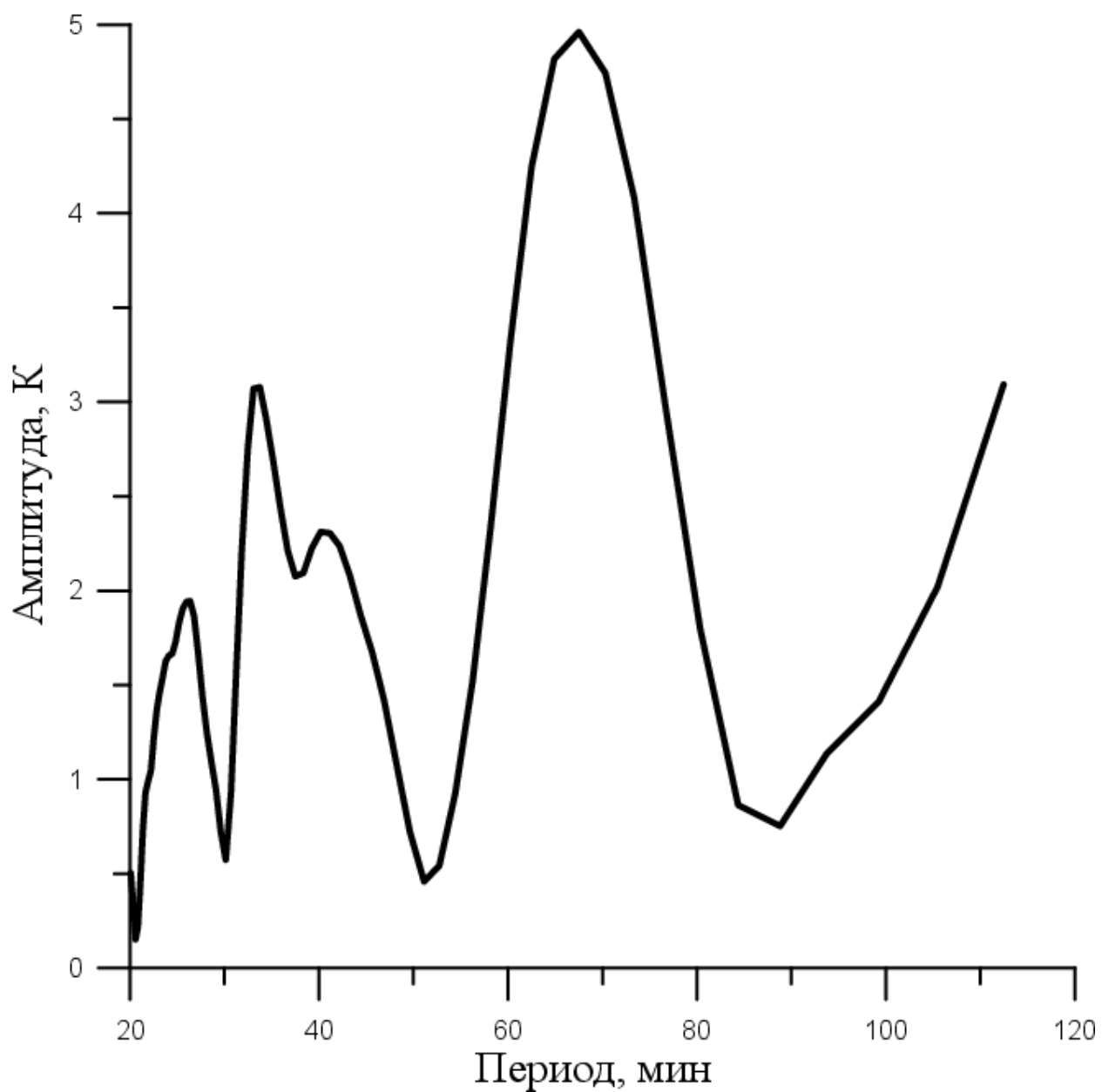


Рисунок А.6. Спектр вращательной температуры.

6 февраля – во время события ВСП.



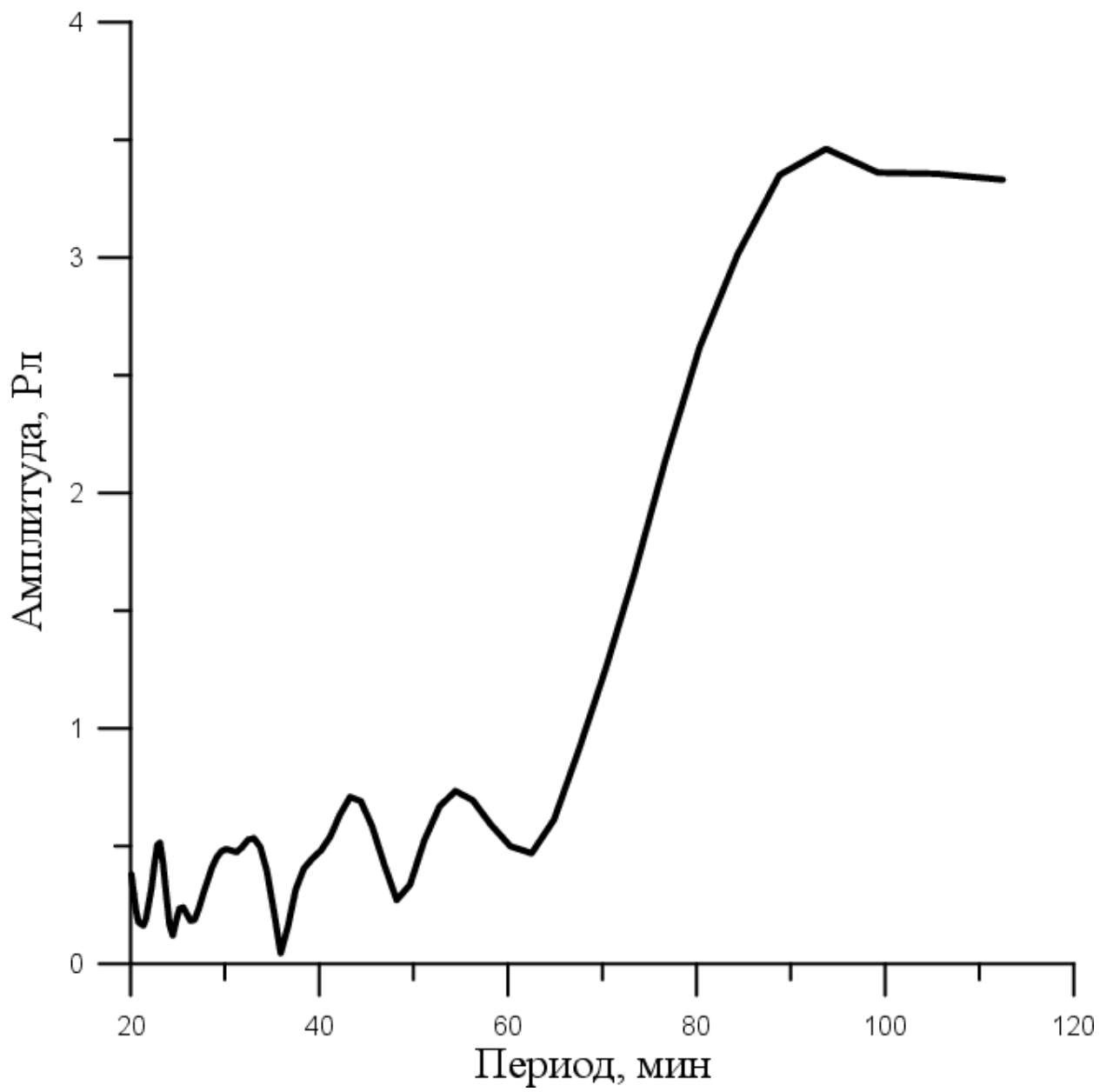


Рисунок А.7. Спектр интенсивности ночного свечения гидроксила  
11 февраля – после события ВСП.

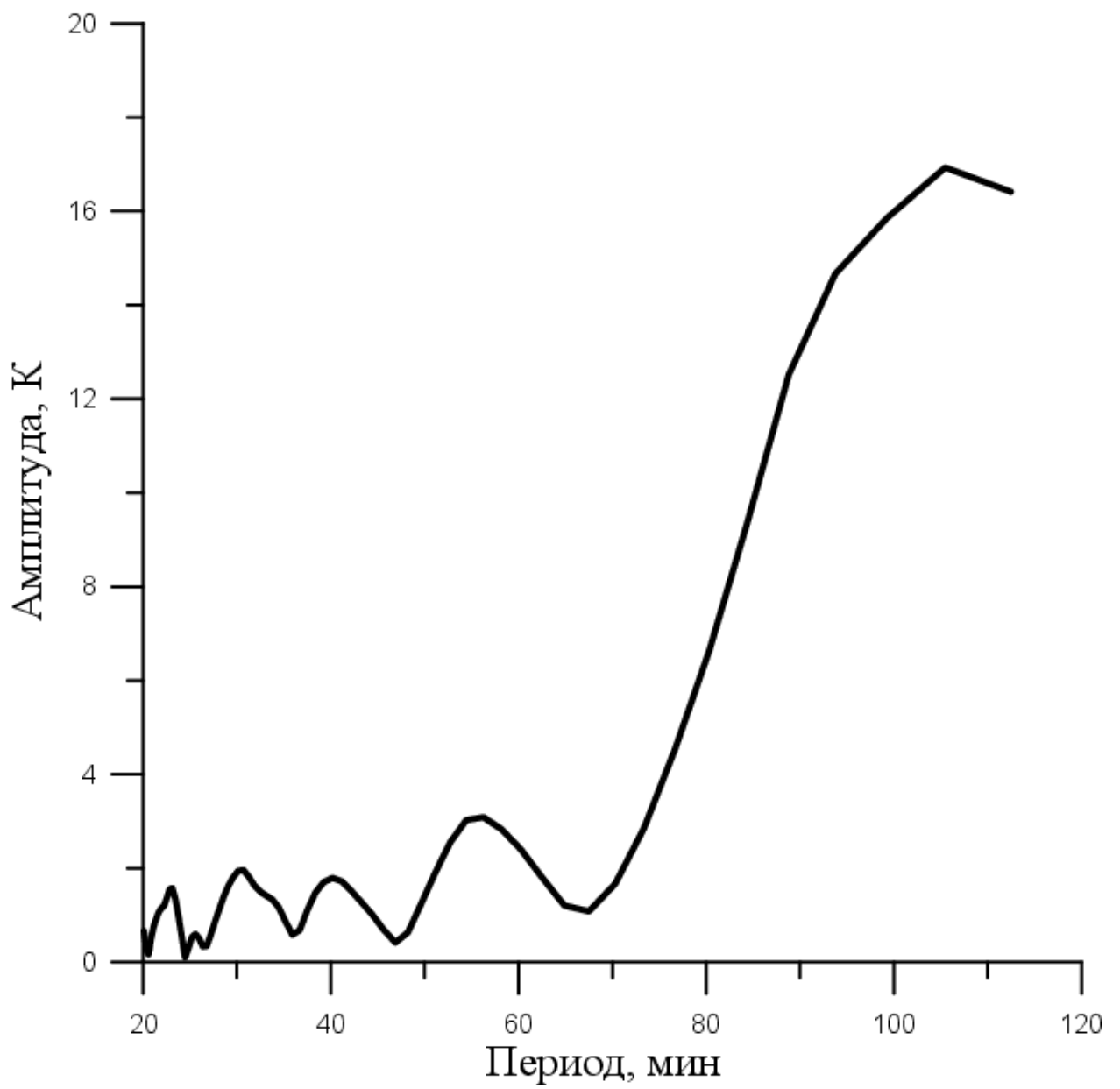


Рисунок А.8. Спектр вращательной температуры.

11 февраля – после события ВСП.

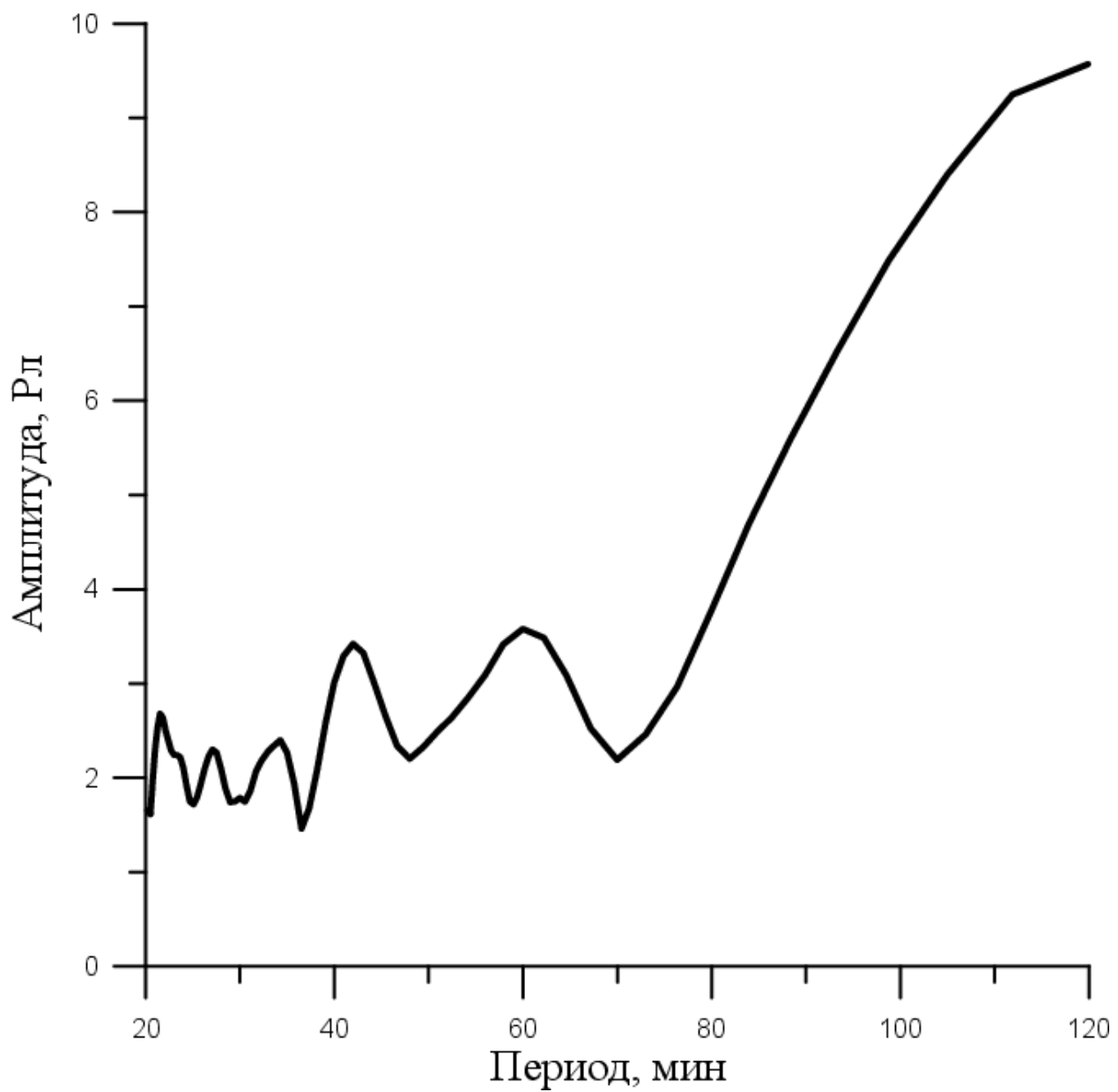


Рисунок А.9. Осредненный спектр интенсивности ночного свечения гидроксидов.

Март.

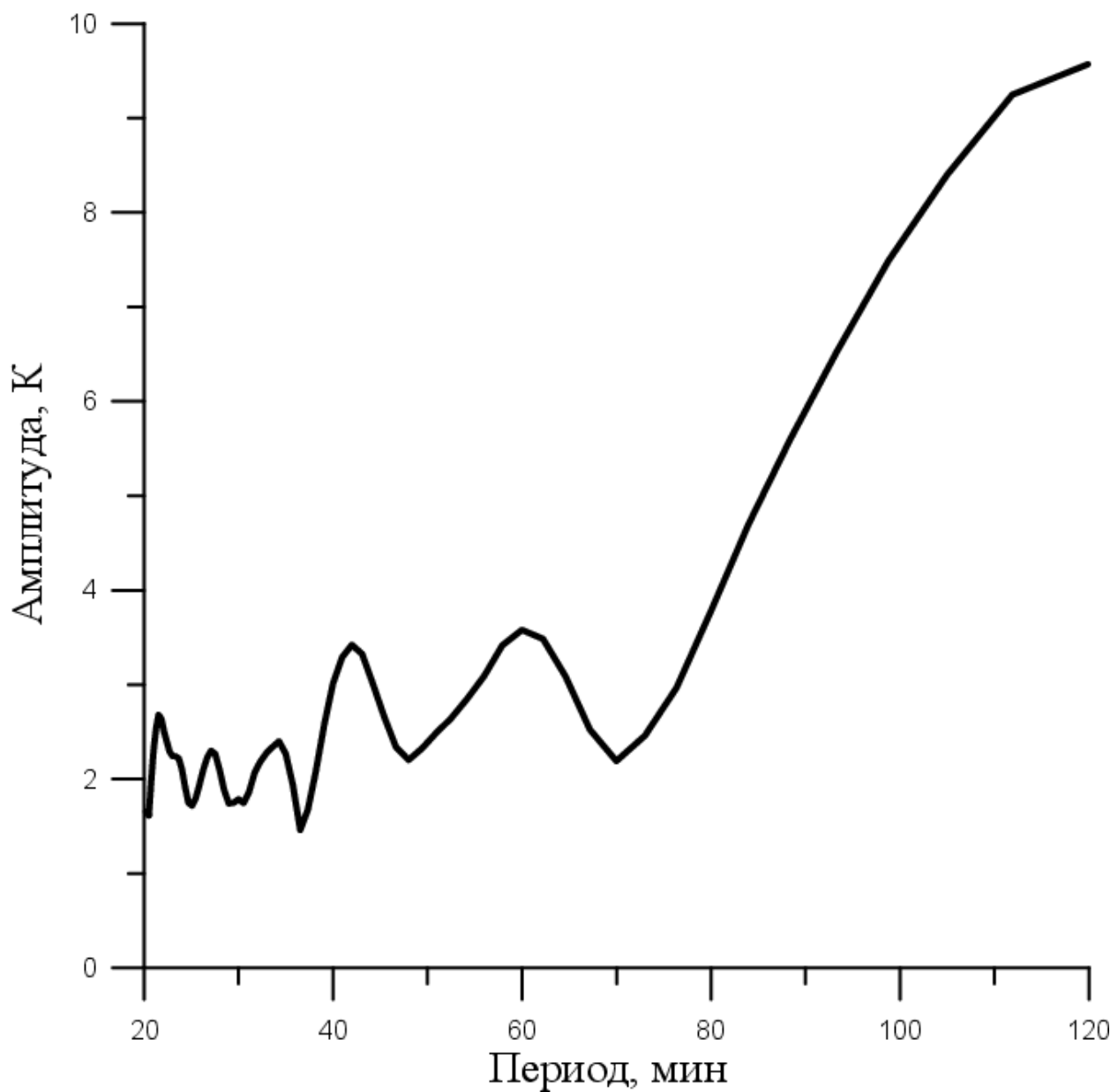


Рисунок А.10. Осредненный спектр вращательной температуры.

Март.

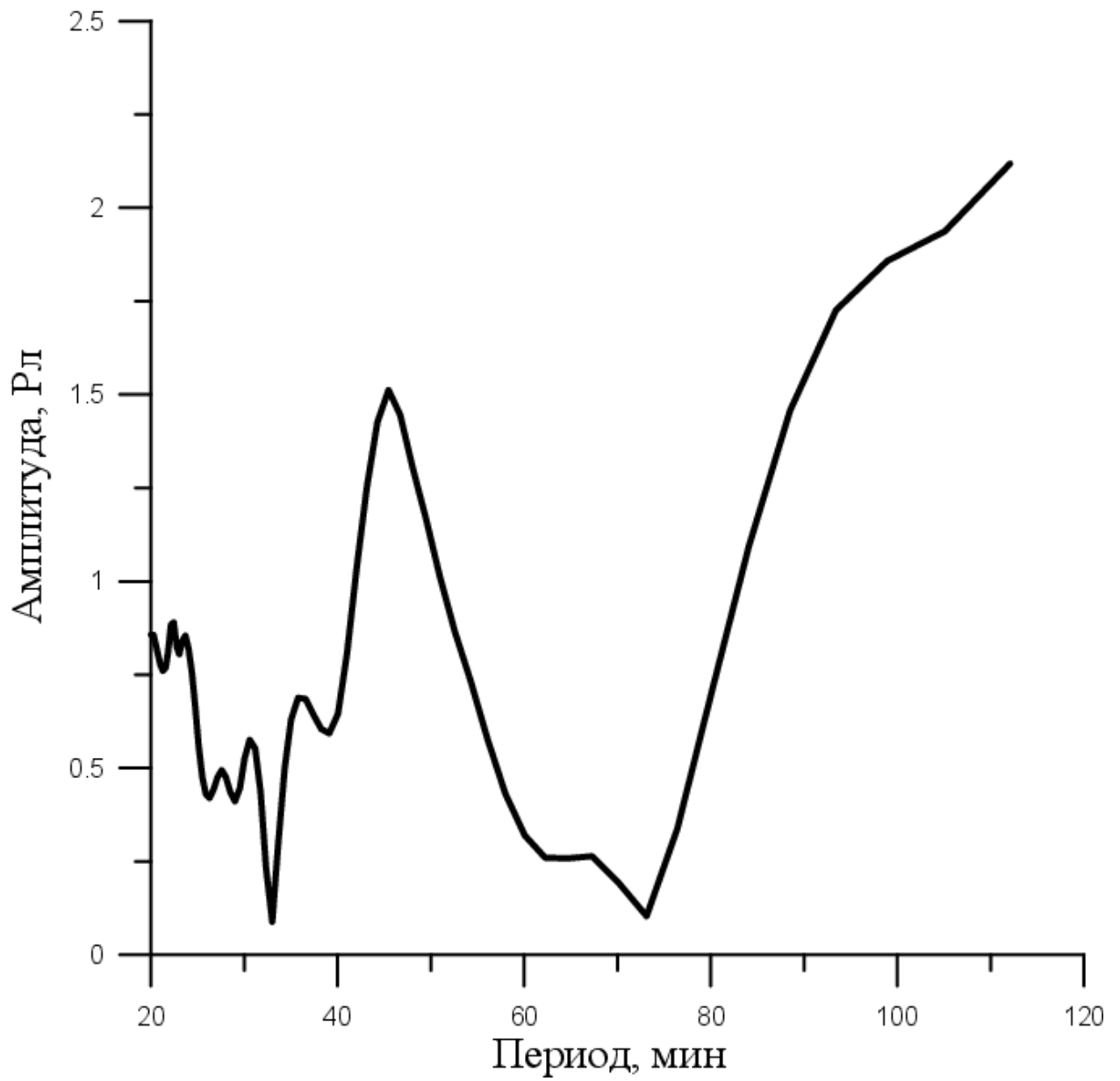


Рисунок А.11. Спектр интенсивности ночного свечения гидроксила.  
5 марта – до события ВСП.

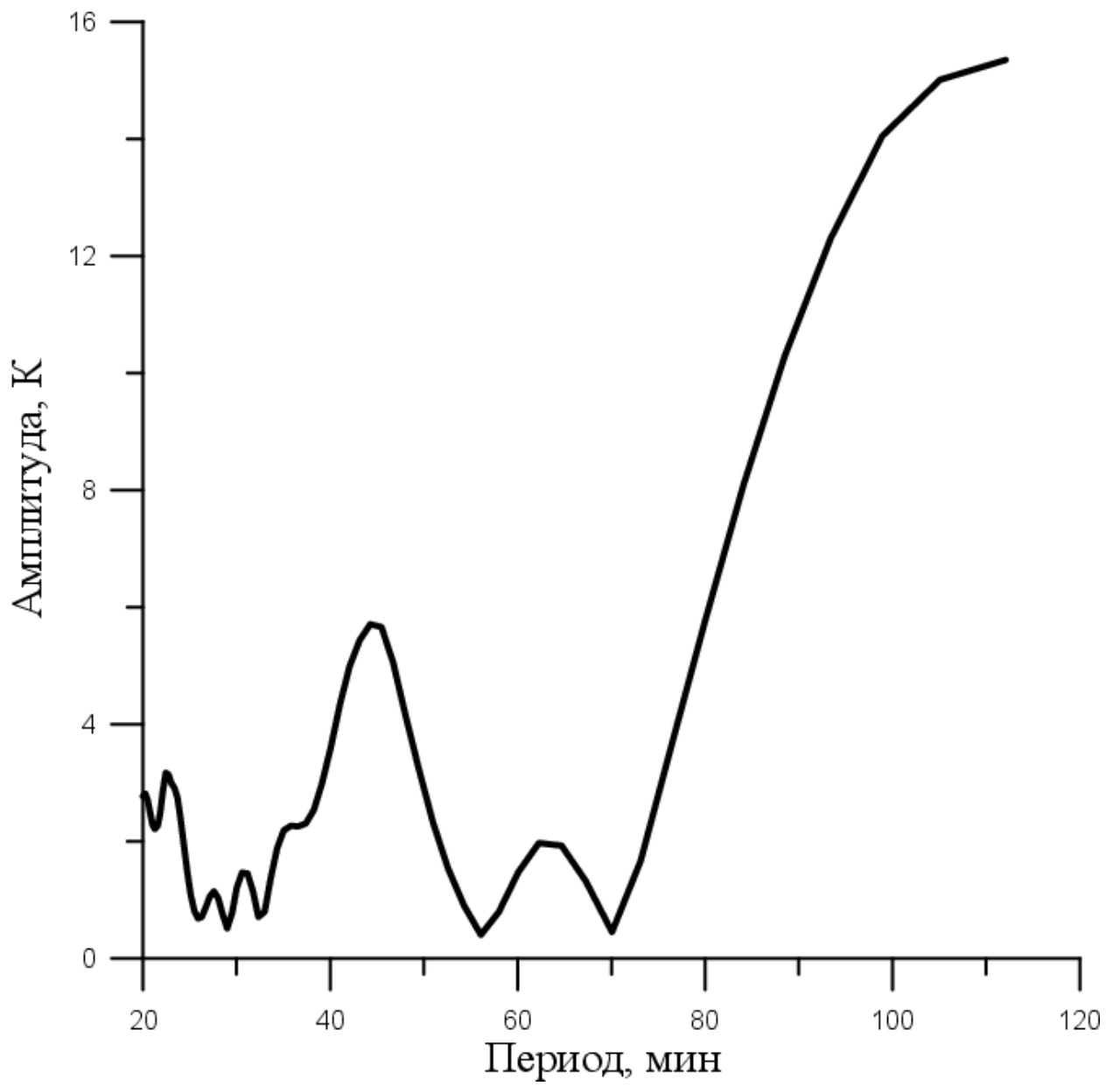


Рисунок А.12. Спектр вращательной температуры.

5 марта – до события ВСП.

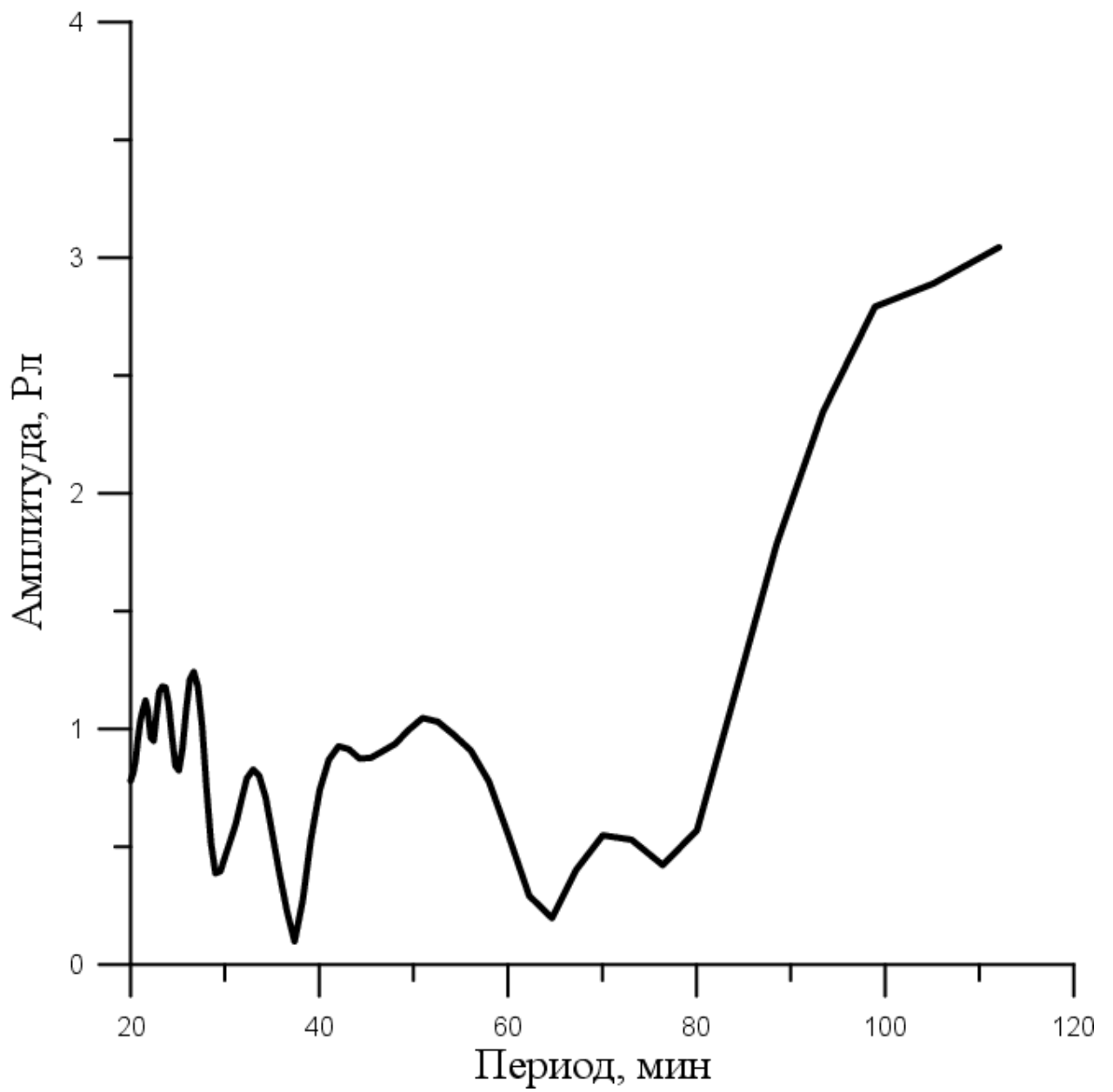


Рисунок А.13. Спектр интенсивности ночного свечения гидроксила.  
6 марта – во время события ВСП.

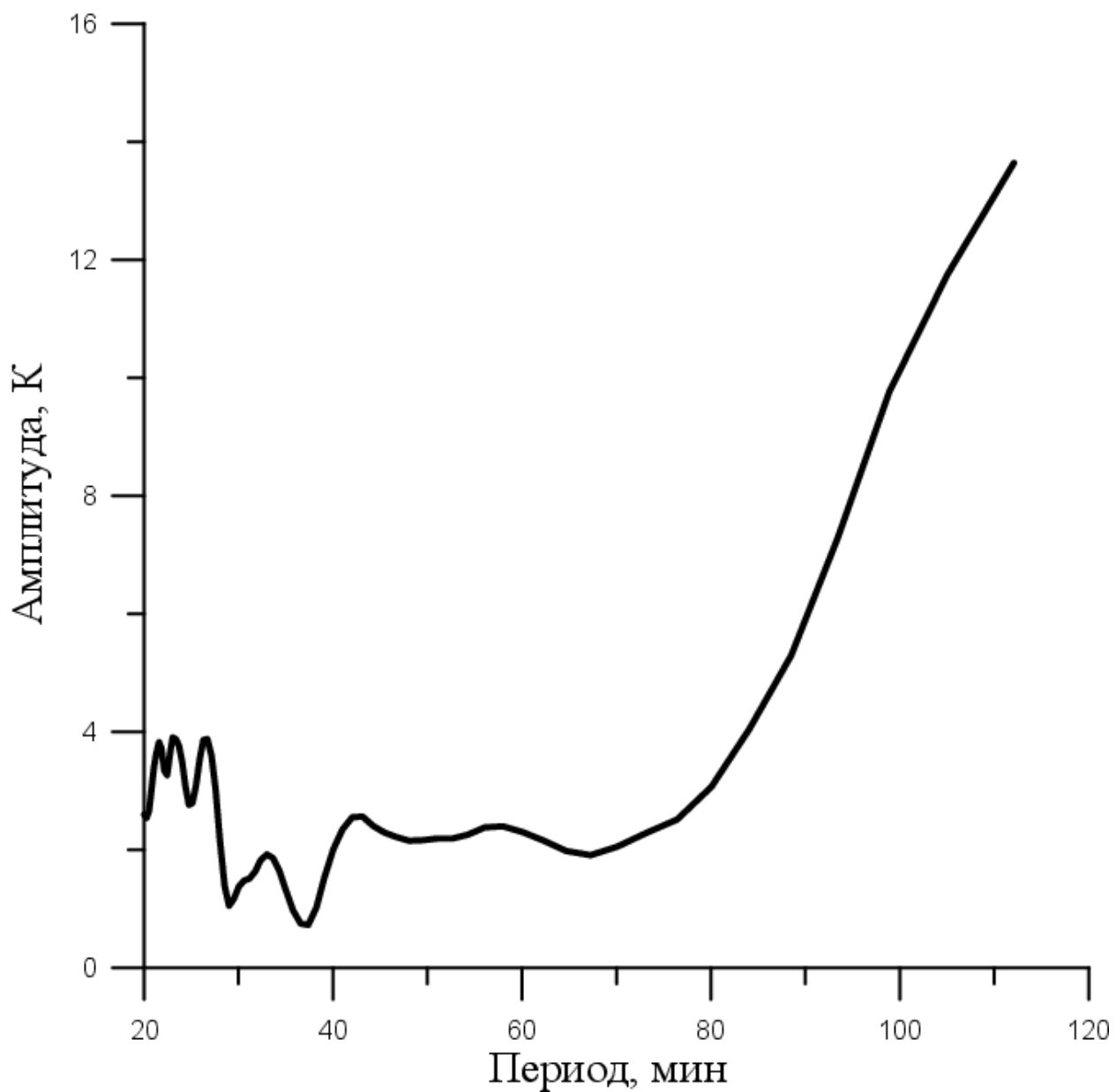


Рисунок А.14. Спектр вращательной температуры.  
6 марта – во время события ВСП.



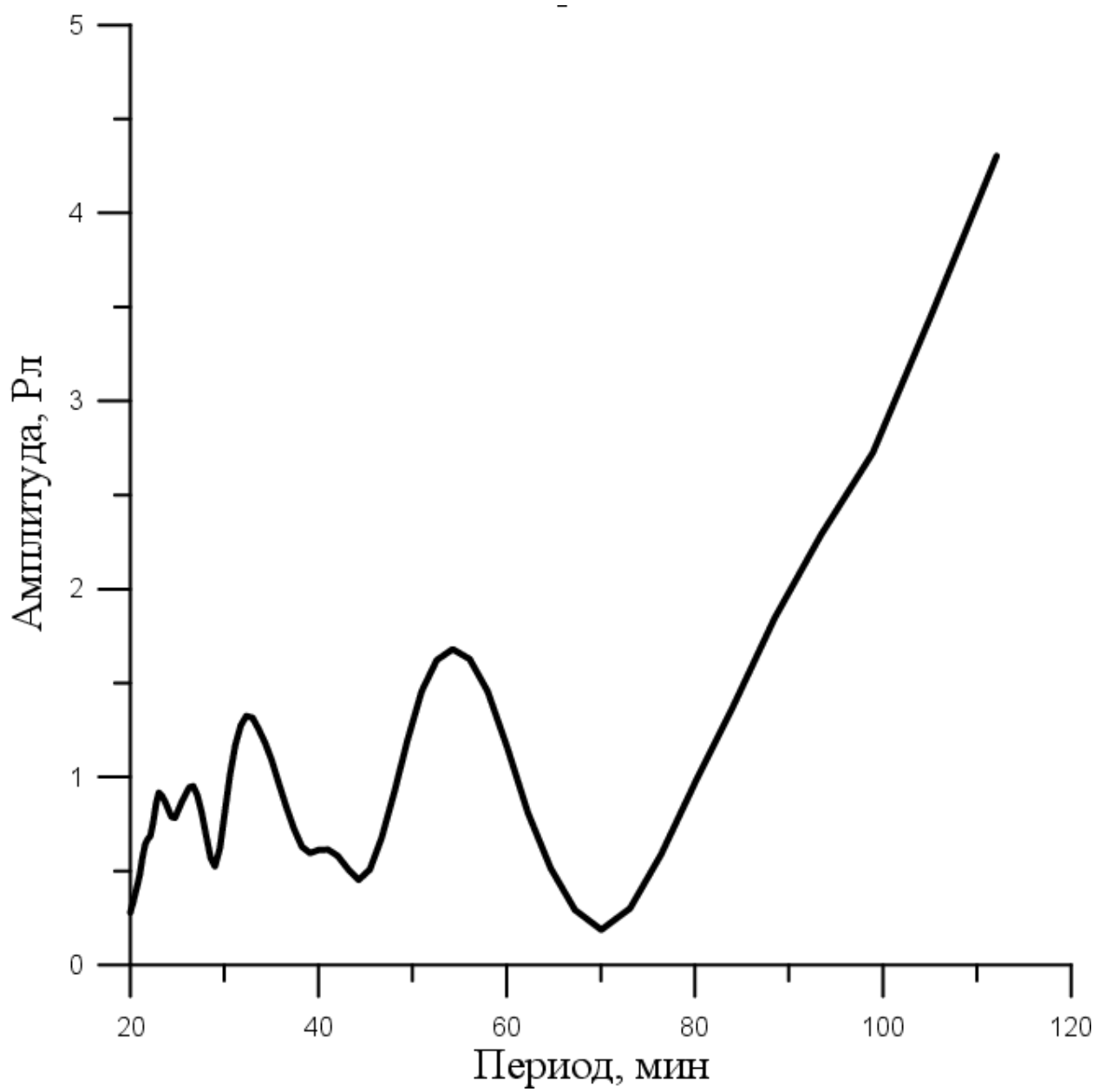


Рисунок А.15. Спектр интенсивности ночного свечения гидроксила.  
9 марта – во время события ВСП.

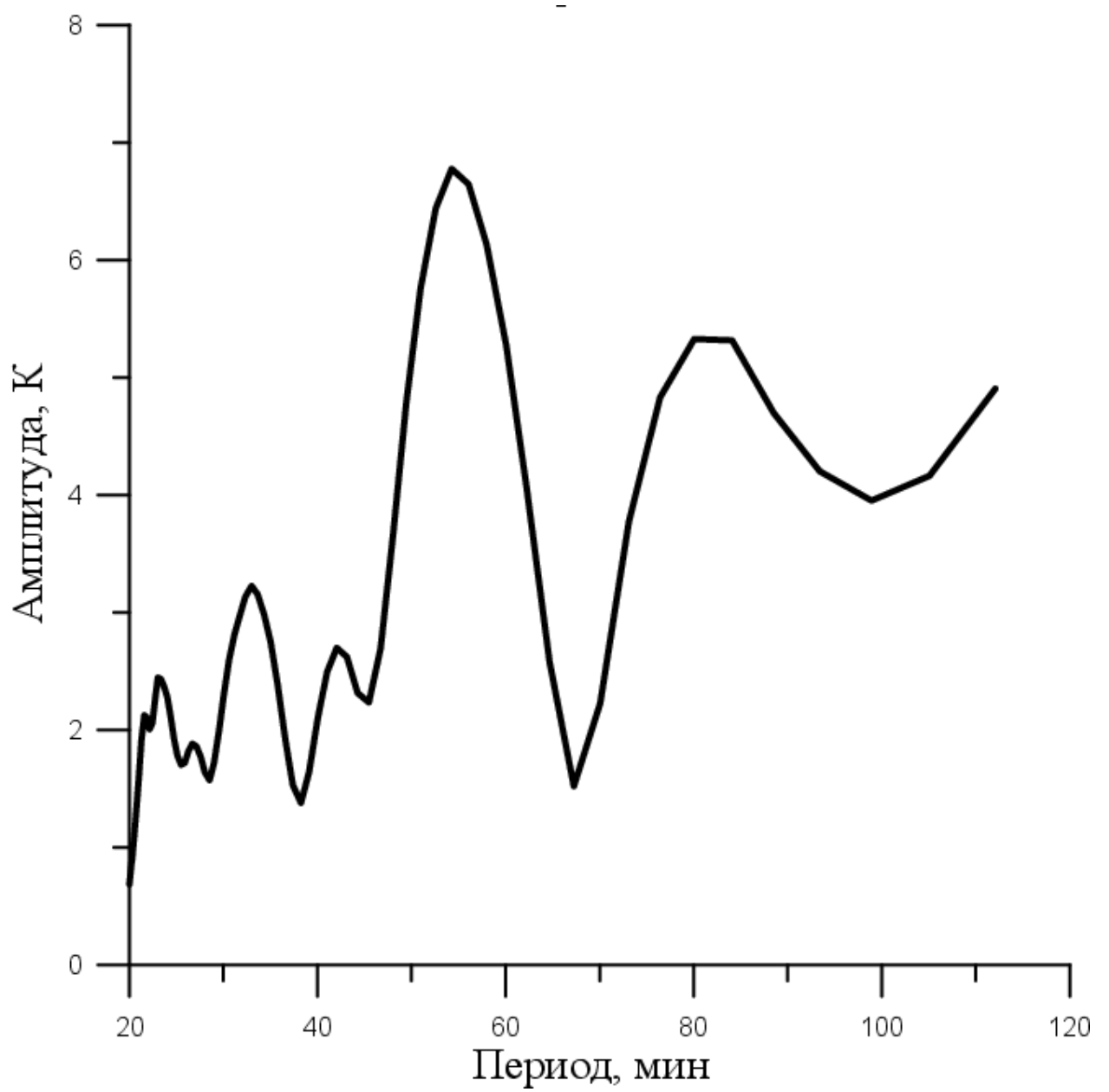


Рисунок А.16. Спектр вращательной температуры.

9 марта – во время события ВСП.