

Лидарные исследования проявления стратосферных потеплений над Томском в 2008–2010 гг.

В.Н. Маричев*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 2.06.2010 г.

Рассматриваются лидарные наблюдения стратосферных потеплений, происходящих в зимние периоды 2008–2010 гг. Наблюдения охватывают фазы возникновения, развития и разрушения потеплений. Зимой 2008/09 г. было зарегистрировано одно сильное потепление 21–22 января, произошедшее в верхней стратосфере с максимальным отклонением температуры от среднемесячной нормы до 60 К. Мажорное потепление наблюдалось в период с 23 по 28 января 2010 г. В отдельные ночи температура в стратопause доходила до +30 °С, а ее высота опускалась до 37–38 км. В феврале очаг потепления постепенно убывал, локализуясь ниже 40 км. Стратопause достигала рекордно низких высот 23–25 км. В апреле вертикальное распределение температуры вышло на описываемую моделью CIRA-86.

Ключевые слова: стратосфера, вертикальное распределение температуры, зимние стратосферные потепления, лидарные наблюдения; *stratosphere, vertical temperature distribution, winter stratospheric warming, lidar observations.*

К настоящему времени лидары нашли широкое применение в исследованиях термического режима средней атмосферы. В первую очередь это связано со сложностью измерений на высотах стратосферы и мезосферы традиционными наземными приборами, с невозможностью или затруднением использования традиционных средств измерений (радиозонды выше 30 км практически не поднимаются, исследования же с помощью метеорологических ракет слишком дороги для обеспечения мониторингового режима) и со значительно более высоким пространственным разрешением лидаров по сравнению с приборами спутникового мониторинга. Глобальный мониторинг температуры проводится в рамках международной программы NDSC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change), выполняемой сетью лидарных обсерваторий NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change). В состав лидарной сети входят следующие известные обсерватории: Eureka (Канада), Ny-Alesund (Норвегия), Sonderstorm (Гренландия), ALOMAR (Andoya, Норвегия) – полярная зона; Hohenpeissenberg (Германия), Haute-Provence (Франция), Table Mountain (США) – среднеширотная зона; Mauna Loa (США), Reunion Island (Индийский океан) – тропическая зона.

В России лидарные наблюдения за вертикальным распределением температуры в стратосфере были начаты ИОА СО РАН в 1994 г. и продолжают

в настоящее время. В 2004–2007 гг. они были поддержаны лидарными пунктами Якутска (ИКФИА СО РАН) и Петропавловск-Камчатского (ИКИРР ДВО РАН), созданных при помощи ИОА СО РАН. Особый интерес в наблюдениях вызывали стратосферные потепления (СП), когда происходят аномальные отклонения температуры от среднемесячных значений. Согласно литературным источникам стратосферные потепления происходят в зимний период в Северном полушарии и проходят более интенсивно в полярных областях [1–4]. Также известно, что в менее интенсивной форме они могут проявляться и в средних широтах [5]. Этот факт был подтвержден нами анализом длительного ряда более ранних лидарных наблюдений над Томском, выполненных в 1996–2000 гг. [6].

Лидарные измерения вертикального распределения температуры по молекулярному (или рэлеескому) рассеянию света основаны на однозначной связи между коэффициентом обратного молекулярного рассеяния $\beta_M(H)$ и плотностью атмосферы $q(H)$ для высоты H . В свою очередь, лидарные сигналы пропорциональны величине $\beta_M(H)$, тогда как плотность атмосферы связана с температурой $T(H)$ через давление $p(H)$ известным законом состояния идеального газа:

$$p(H) = R^* q(H) T(H), \quad (1)$$

где R^* – удельная газовая постоянная.

При условии выполнения гидростатического равновесия

* Валерий Николаевич Маричев (marichev@iao.ru).

$$dp(H) = -g(H)q(H)dH \quad (2)$$

и отсутствия на зондируемом интервале аэрозольных слоев может быть установлена связь между температурой и лидарными сигналами:

$$T(H) = \frac{P^2(H)}{N(H)H^2} \times \left[\frac{N(H_{\max})H_{\max}^2 T(H_{\max})}{P^2(H_{\max})} + \frac{1}{R^*} \int_{H_{\max}}^H \frac{N(h)h^2 g(h) dh}{P^2(h)} \right] \quad (3)$$

Здесь и выше g — ускорение свободного падения; $N(H)$ — лидарный сигнал; $P(H)$ — прозрачность молекулярной атмосферы от уровня расположения лидара до высоты H ; H_{\max} — максимальная высота, на которой регистрируются достаточно надежные для обработки сигналы.

Результаты наблюдений температурных аномалий в стратосфере над Томском в 2008/09 г.

Ниже в работе приводятся результаты лидарных наблюдений вертикального распределения температуры в стратосфере над Томском в 2008–2010 гг. с акцентом на исследование проявлений зимних стратосферных потеплений. Данные представлены в виде вертикальных профилей температуры, построенных по ночным сигналам, полученным с накоплением в течение 2 ч и более и пространственным разрешением 100–300 м. Максимальный интервал высот расчета температуры по лидарным измерениям простирался от 10 до 60 км.

Выборочные результаты наблюдений за период октябрь 2008 — март 2009 г. приведены на рис. 1.

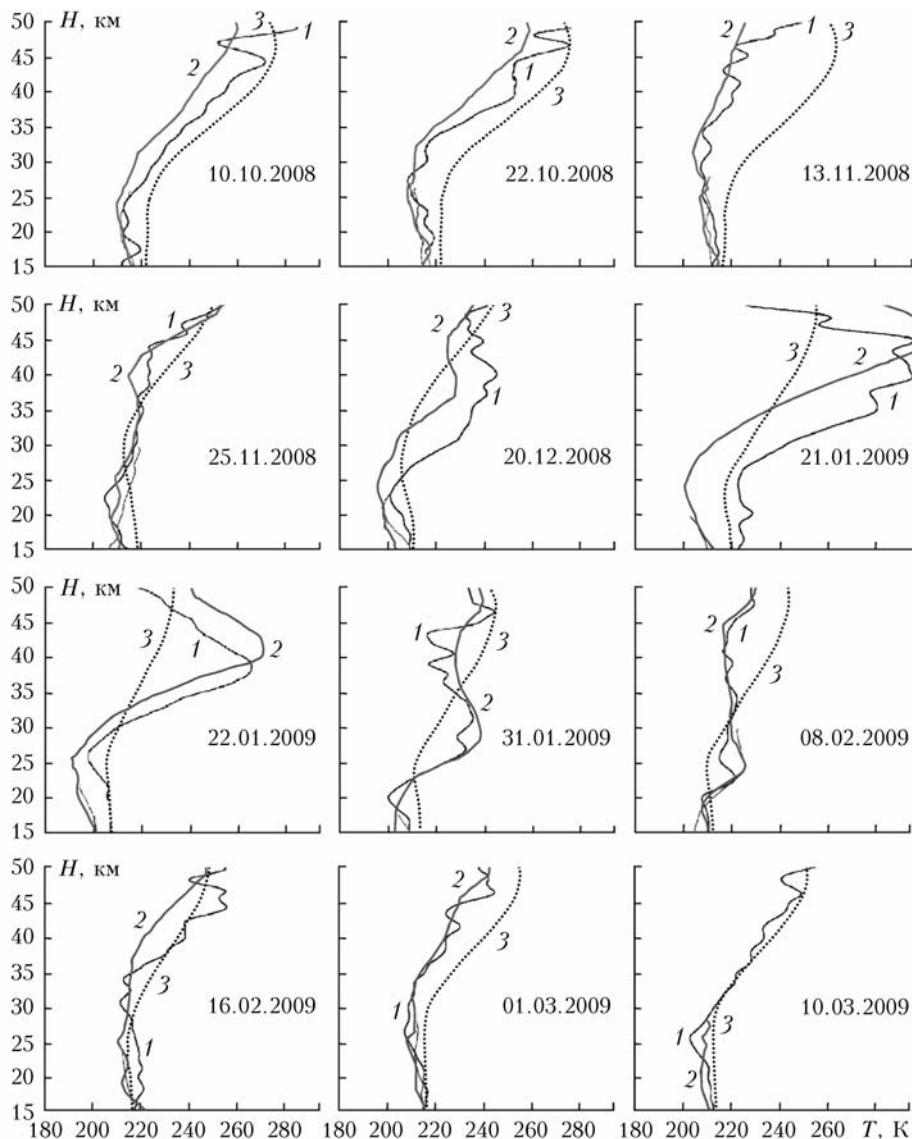


Рис. 1. Выборочные профили температуры, полученные из лидарных наблюдений за период октябрь 2008 г. — март 2009 г.

Здесь кривыми 1 показаны лидарные профили температуры, кривыми 2 и 3 — профили из данных спутника Aura и модели CIRA-86. Также в нижней части графиков тонкими линиями приведены профили аэрологического зондирования метеостанции Колпашево.

Видно, что в октябре, ноябре и начале марта вертикальное распределение температуры с небольшими отклонениями соответствует модельному. Значительные стратосферные потепления были замечены в декабре и январе. Так, для более сильных январских потеплений, наблюдаемых 21 и 22 января 2009 г., максимальное отклонение достигало 60 К, а высота стратопазы опускалась до 37 км.

Лидарные наблюдения СП подтверждаются спутниковыми. В частности, 20 декабря и 21 января отмечается подобие в поведении вертикальных профилей температуры, а 22 и 31 января их хорошее совпадение. Профиль за 31 января интересен тем, что относительно модельного профиля температуры имеет вид положительных и отрицательных полуволн: отрицательная в нижней (20–30 км) и положительная (30–47 км) в верхней части. Для подавляющего большинства профилей отмечается хорошее соответствие профилям аэрологического зондирования.

Далее мы не будем анализировать менее интересный период весна–осень 2009 г., со стабильной ситуацией, для которого характерно модельное распределение температуры, а рассмотрим данные зондирования за зимне-весенний период 2009/10 г., охватывающий начало формирования, развитие и разрушение СП.

Результаты наблюдений температурных аномалий в стратосфере над Томском в 2009/10 г.

На графиках, приведенных ниже (рис. 2–6), показаны лидарные профили температуры со стандартными отклонениями и гладкими кривыми модельные профили CIRA-86. Там, где было возможно, приведены температурные профили аэрологического (ближайшие станции Новосибирск и Колпашево, расположенные на расстоянии 210 и 240 км от Томска) и спутникового (Aura) синхронного зондирования.

Наблюдения стратификации температуры за декабрь приведены на рис. 2.

Видно, что для второй половины декабря 2009 г. вертикальное распределение температуры, рассчитанное по лидарным измерениям, следовало модельному начиная с высот 30 км. Небольшое отклонение в положительную сторону начало проявляться с 21 декабря. В нижней части профиля до высот 30 км (наблюдения за 18 и 23 декабря) лидарные значения температуры были ниже зондовых примерно на 5–7 °С.

Динамичное поведение вертикального распределения температуры отмечалось в январе 2010 г. (рис. 3).

Первое температурное возмущение было зарегистрировано 15 января. Это был очаг теплого воздуха в области высот 34–44 км с отклонением от модельного профиля с 20 до 40 К в максимуме на высоте 40 км. К 18 января произошла некоторая его трансформация с опусканием и перемещением максимума на высоты 34–36 км. Далее 19 января весь профиль температуры в области высот 32–44 км по значениям оставался выше модельного, а 21 января появилась двугорбая структура с четко обозначенными максимумами на высотах 36 и 40 км с отклонениями от среднеянварского профиля примерно на 20 К.

Следующее мощное стратосферное потепление было зафиксировано 22 января. Стратопауза резко опустилась на высоту 38 км. Перепад температур на уровне стратопазы (максимум в вертикальном распределении) составил более 60 К, что для Томска за весь период лидарных наблюдений, начиная с 1996 г. [6], было отмечено впервые. Подобная структура распределения в виде мощного очага потепления в стратосфере и похолодания в мезосфере (в смысле классического определения высотных интервалов этих областей атмосферы в невозмущенном состоянии) оставалась и 23 января. А 24 января произошла трансформация этого теплового очага в достаточно локализованный слой меньшей интенсивности на высотах 34–43 км с максимумом на высоте 40 км. Таким образом, на основании непрерывных измерений от 21 до 24 января было установлено, что мощное СП просуществовало около 2 сут.

В последующие дни начиная с 25 января вертикальное распределение температуры приближается к наблюдаемому ранее 22–23 января, а 26 января как по форме (положительная и отрицательная полуволны), так и по интенсивности становится идентичным ему с пиком на высоте 38 км.

28 и 29 января температура в слое потепления убывала, а стратопауза опускалась до уровня 30 км. При этом полуволновая структура сохранялась. Далее 30 и 31 января температура продолжала снижаться, а очаг потепления переместился в область высот ниже 40 км.

Стратосферные потепления несколько меньшей интенсивности наблюдались и в феврале (рис. 4). В первых двух декадах февраля потепление регистрировалось в интервале высот от 20 до 40 км с некоторым его уменьшением в отдельных наблюдениях. Однозначно уровень высоты стратопазы определить было нельзя, поскольку в обозначенном выше интервале высот могли оказаться несколько пиков профилей температуры либо его квазипостоянный ход с высотой. Максимальное значение температуры за первую декаду, кроме 1 и 2 февраля, находилось на отметке около 240 К. С 12 декабря происходит очередное понижение высоты стратопазы, которое 19 февраля четко остановилось на отметке 23 км. Эта высота сохранилась для последней декады. Также в этой декаде начинаются незначительное похолодание на высоте более 35 км и разрушение теплового очага, локализованного в нижней стратосфере.

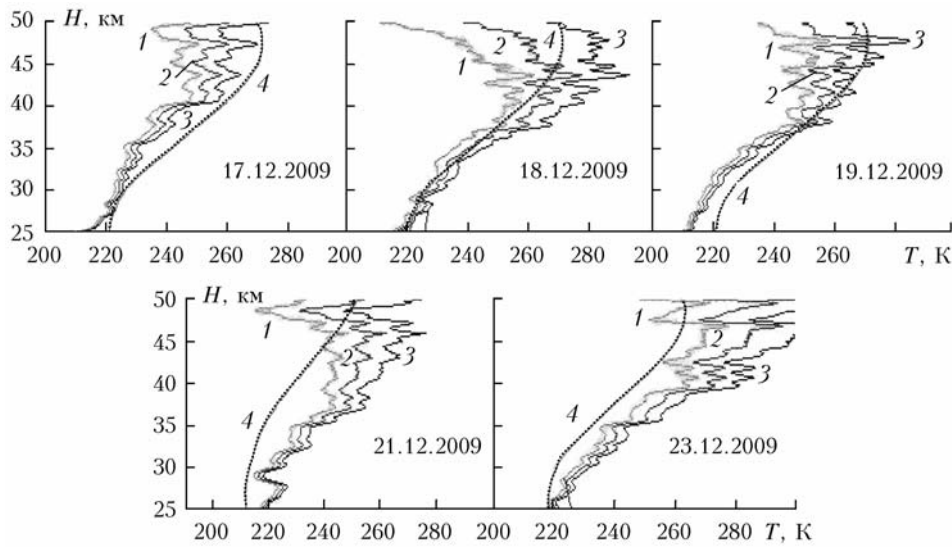


Рис. 2. Лидарные наблюдения температуры в декабре 2009 г. Обозначения кривых на рис. 2–6: 2 – лидарный профиль температуры со стандартным отклонением 1, 3; 4 – профиль температуры по модели CIRA-86

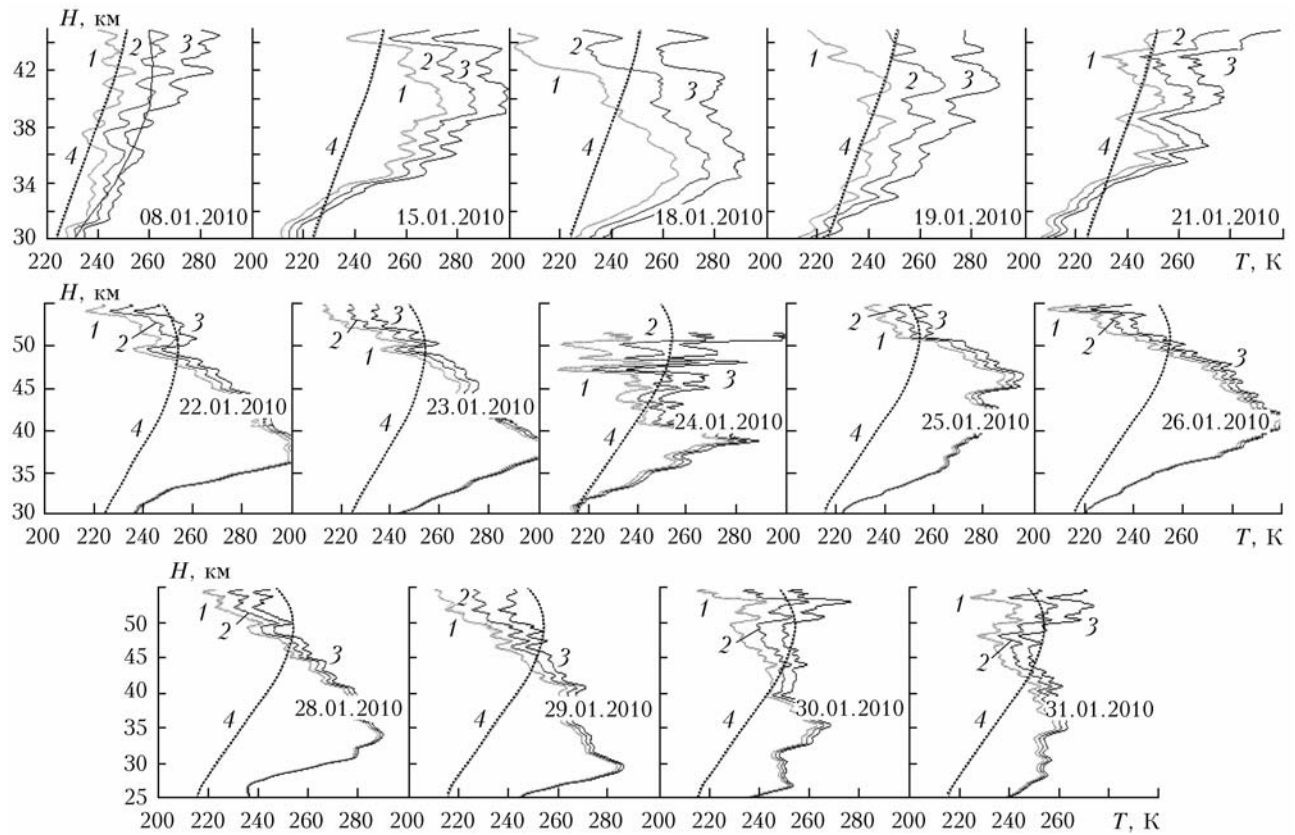


Рис. 3. Лидарные наблюдения аномального распределения температуры в стратосфере в январе 2010 г.

Часть наблюдений в феврале нам удалось сопроводить данными аэрологического и спутникового зондирования. Сравнение с показаниями метеозондов для первой декады показало их отличное количественное совпадение с лидарными измерениями (см. нижнюю часть графиков). Количественное совпадение с данными спутникового зондирования было несколько хуже, однако отмечается качественное подобие вертикальной структуры температурных про-

филей. Указанное несоответствие вполне может быть вызвано большим пространственным усреднением спутниковых измерений, различием времени и местом наблюдений.

На рис. 5 показаны результаты зондирования температуры в марте 2010 г.

Особенность вертикальной структуры температуры в марте определяется завершением возмущений стратосферы потеплениями и переходом к спокойному

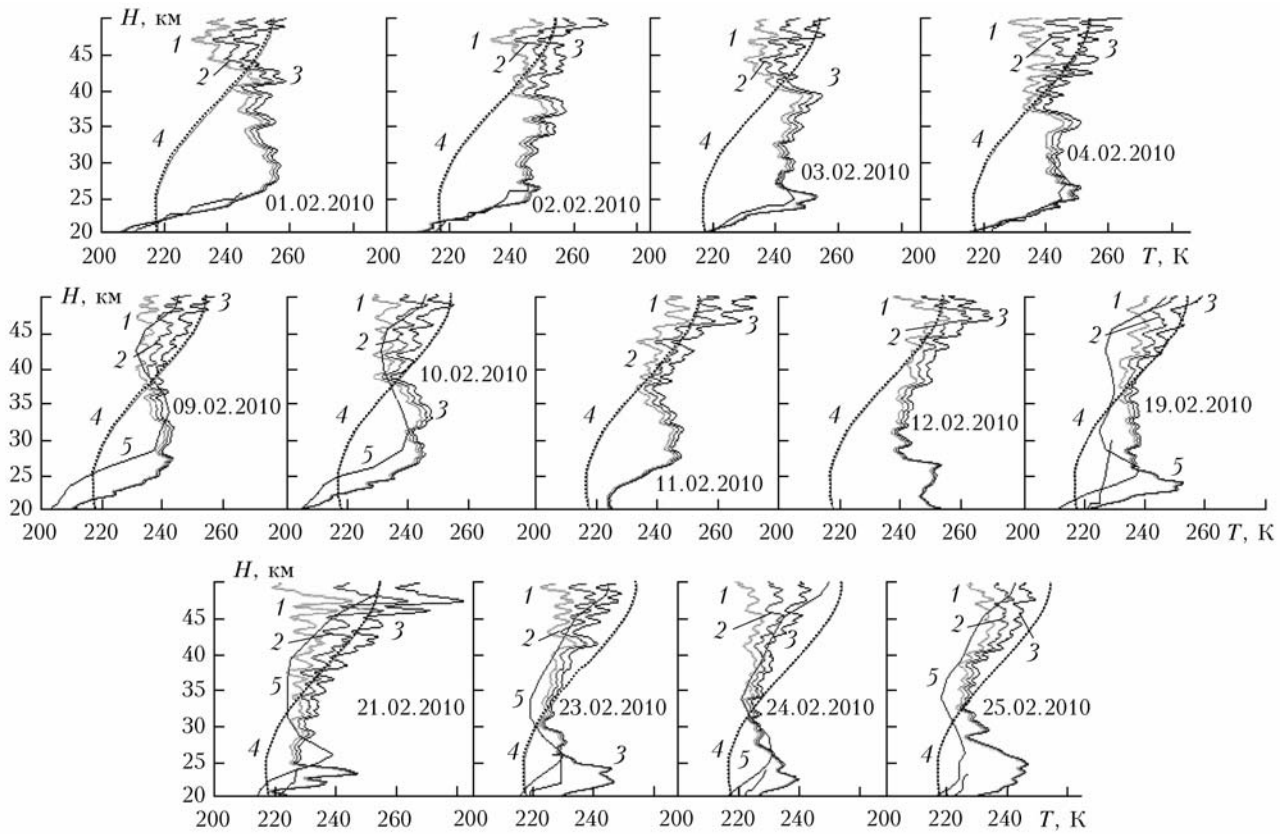


Рис. 4. Лидарные наблюдения аномального распределения температуры в стратосфере в феврале 2010 г. Кривой 5 на рис. 4–6 обозначены профили температуры, измеренные спутником Aura

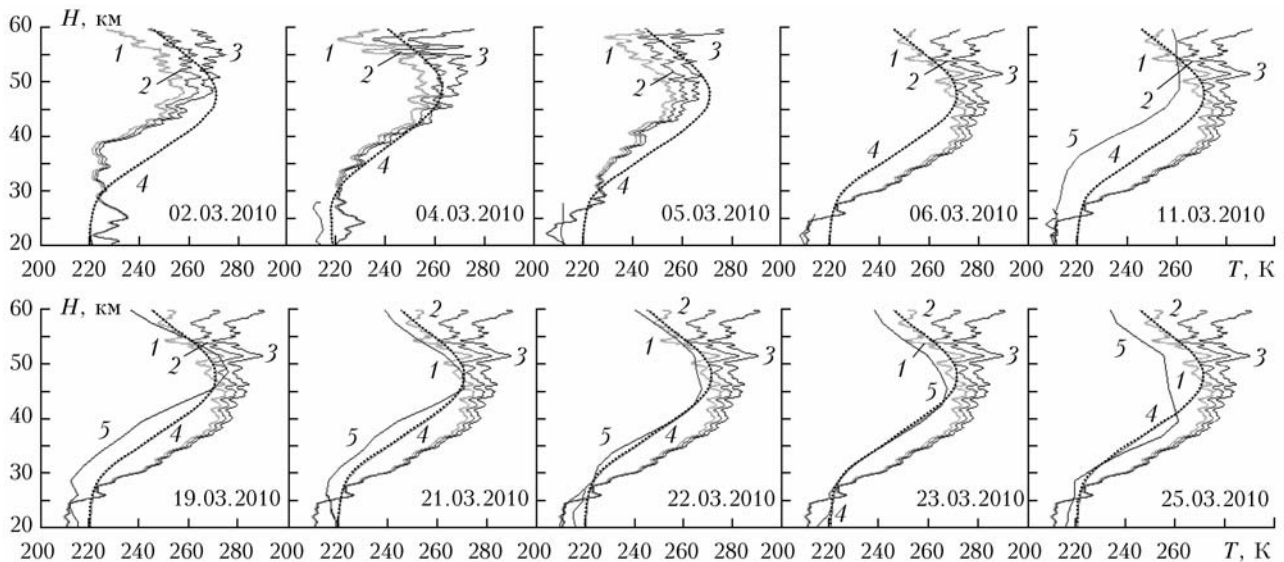


Рис. 5. Лидарные наблюдения вертикального распределения температуры в марте 2010 г.

периоду. В таких условиях, как видно из рис. 5, вертикальное распределение температуры следует модельному. Соответствие лидарных профилей модельным усиливается в апреле (рис. 6).

По результатам зимне-весеннего зондирования температуры в 2008–2010 гг. можно сделать следующие выводы. Выявленные за этот период потепления были самыми продолжительными за весь опыт

лидарных наблюдений с 1996 г., которые начались с 15 января и завершились в конце февраля, а также самыми мощными, при которых температура в отдельные ночи в стратосфере доходила до $+30^{\circ}\text{C}$, а уровень стратосферы опускался до 37–38 км. Почти до конца января характерной для профиля температуры была структура с положительной полуволевой в стратосфере и отрицательной в мезосфере.

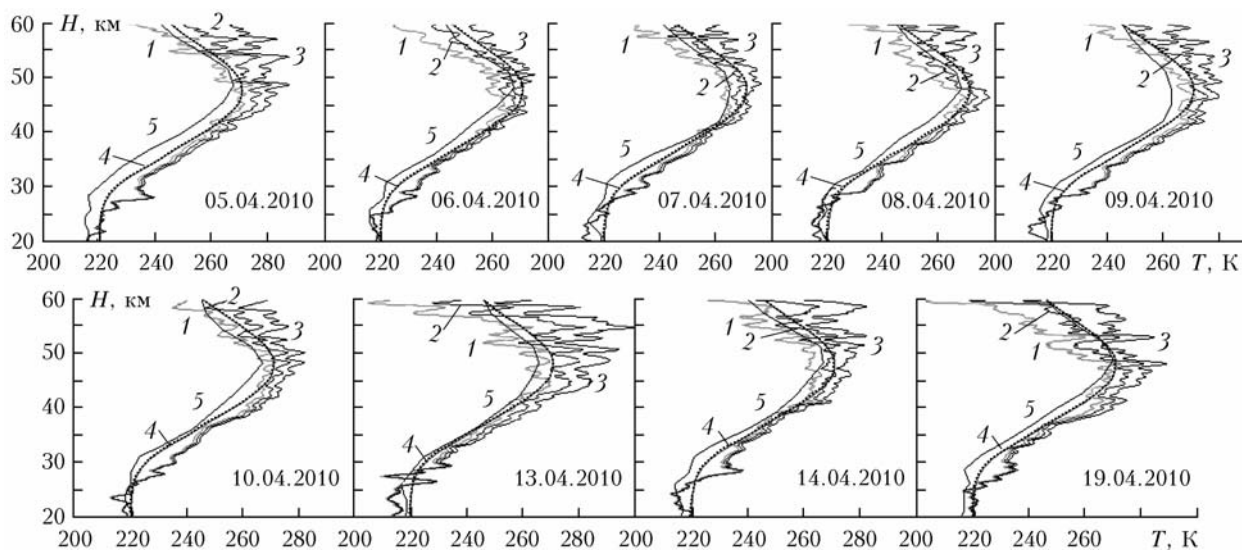


Рис. 6. Лидарные наблюдения вертикального распределения температуры в апреле 2010 г.

С конца января и весь февраль очаг потепления постепенно убывал и был локализован только в нижней части профиля ниже 40 км. Стратопауза опускалась до рекордно низких высот 23–25 км. В верхней части профиля распределение температуры было близко к модельному и измеренному со спутника.

Автор выражает благодарность сотруднику ИСЗФ СО РАН М.А. Черниговской за любезно предоставленную информацию по данным спутникового зондирования температуры.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке проекта Минобрнауки РФ АВИЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» № 2.1.1/1333 (2011 г.), интеграционного научно-исследовательского проекта СО РАН – ДВО РАН – НАН Украины «Диагностика динамических процессов в среднеширотной и субполярной атмосфере» и гранта РФФИ

№ 10-05-00907-а «Выявление региональных особенностей условий формирования и механизмов образования аэрозольных слоев в стратосфере и мезосфере северного полушария».

1. *Атмосфера*: Справочник. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 510 с.
2. *Хромов С.П., Мамонтова Л.И.* Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеоздат, 1974. 568 с.
3. *Кокина Г.А., Гайгеров С.С.* Метеорология верхней атмосферы земли. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 270 с.
4. *Холтон Дж.Р.* Динамическая метеорология стратосферы и мезосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1979. 224 с.
5. *Гайгеров С.С., Жорова Э.Д.* Термический режим и циркуляция в средней атмосфере // *Метеорол. и гидрол.* 1986. № 7. С. 5–10.
6. *Маричев В.Н.* Лидарные наблюдения зимних стратосферных потеплений над Томском в 1996–2000 гг. // *Метеорол. и гидрол.* 2001. № 8. С. 41–48.

V.N. Marichev. Lidar investigations of stratospheric warming events above Tomsk in 2008–2010.

Results of lidar observations of stratospheric warming events in winter of 2008–2010 are presented. Observations cover the phases of the development and decay of the warming events. In winter of 2008/09, one strong warming event was recorded in the upper stratosphere with maximum temperature deviation from its monthly average up to 60 K on January 21–22. Major warming was observed from January 23 till January 28, 2010. At some nights, the temperature in the stratosphere reached +30 °C, and the tropopause height decreased down to 37–38 km. In February, the degree of warming gradually decreased, and its region was localized below 40 km. The stratopause height reached recordly low values of 23–25 km. In April, the vertical temperature profile was well described by the CIRA-86 model.