

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.524.7:551.510.532

Лидарные исследования термического режима стратосферы над Томском за 2012–2015 гг.

В.Н. Маричев, Д.А. Бочковский*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 3.03.2017 г.

Представлены результаты исследования вертикальных распределений температуры над Томском в возмущенный и спокойный периоды за 2012–2015 гг. На основании накопленного экспериментального материала установлен ряд особенностей внутрigoдовой динамики термического режима стратосферы. Так, зимнее стратосферное потепление происходит ежегодно. За указанный период было зарегистрировано одно сильное (мажорное) потепление в 2012/13 гг., при котором в верхней атмосфере направление переноса воздушных масс сменилось с западного на восточное, и три слабых (минорных) – в 2011/12, 2013/14 и 2014/15 гг. На основе данных многолетних наблюдений показано, что в Западной Сибири в течение длительного периода года (апрель–ноябрь) вертикальное распределение температуры в подавляющем большинстве случаев хорошо согласуется с модельным распределением CIRA-86.

Ключевые слова: лидар, температура, стратосферное потепление; lidar, temperature, stratospheric warming.

Введение

Лидарные исследования термического режима стратосферы над Томском на регулярной основе были начаты в Институте оптики атмосферы (ИОА) СО РАН в 1994 г. и продолжаются по настоящее время. Особый интерес вызывают температурные аномалии, обусловленные зимними стратосферными потеплениями (СП). Последние были открыты Р. Шерхагом еще в 1952 г. Их исследования по-прежнему актуальны в связи с влиянием на динамику и термическую структуру зимней средней атмосферы [1].

Стратосферное потепление – это сильное и внезапное повышение температуры «взрывного характера» в течение нескольких суток [2]. По классификации Всемирной метеорологической организации, потепления разделяются на сильные и слабые (мажорные и минорные) [3]. При сильных потеплениях западный перенос воздушных масс меняется на восточный на уровне 10 гПа. Они захватывают стратосферу и мезосферу и случаются не каждую зиму. В результате сильных СП происходит ослабление полярного стратосферного вихря, его смещение и/или расщепление. В отличие от сильных СП, слабые потепления наблюдаются каждую зиму и часто локализуются в определенном слое.

Считается, что основным механизмом образования СП является динамическое взаимодействие распространяющихся из тропосферы в стратосферу планетарных волн с зональным течением, приводя-

щее к их разрушению и выделению тепла [4]. Также предполагается, что локальные СП могут быть вызваны вертикальным перемещением внутренних гравитационных волн [5–7]. Есть и другие версии возникновения СП, предполагающие наличие источника зимних стратосферных потеплений в верхних слоях атмосферы. В целом их природа еще не до конца выяснена.

Наиболее интенсивное влияние СП оказывают на динамику вертикального распределения температуры в полярных областях [2, 3, 7, 8]; оно может распространяться и на средние широты [9]. Это было показано в наших ранних лидарных наблюдениях над Томском, Якутском и Паратункой (Камчатка) [10–14].

В настоящее время в исследованиях термического режима средней атмосферы широко применяются лидары, в первую очередь в связи с труднодоступностью измерений на этих высотах традиционными наземными средствами, а также со значительно более высоким пространственным разрешением, обеспечиваемым лидарами, по сравнению со спутниковыми наблюдениями. Например, в скандинавском регионе сосредоточена целая группа лидарных обсерваторий, среди задач которых – изучение температурных аномалий в стратосфере (именно зимних СП). К этой группе относятся такие обсерватории, как Ny-Alesund (Шпицберген), ESRANGE и Kiruna (Швеция), ALOMAR (Норвегия), Sodankula (Финляндия). В России лидарные исследования СП проводятся на межрегиональной лидарной сети РАН, созданной ИОА и ИКФИА СО РАН и ИКИР ДВО РАН, над Западной и Восточной Сибирью и Камчаткой [10–19] и в НПО «Тайфун» (г. Обнинск) [20].

* Валерий Николаевич Маричев (marichev@iao.ru); Дмитрий Андреевич Бочковский (moto@iao.ru).

В работе анализируются проявления СП над Томском по результатам наблюдений на лидарной станции ИОА СО РАН в 2012–2015 гг.

Лидарный комплекс, условия проведения измерений и статистика

Измерения вертикального распределения температуры проводились с помощью лидарных методов упругого молекулярного и спонтанного комбинационного рассеяния света (в иностранной литературе – рассеяния Рэля и Рамана) при лазерном зондировании атмосферы на длине волны 532 нм. Профили температуры $T(H)$ рассчитывались по рэлеевским и рамановским сигналам:

$$T(H) = \frac{P_1(H)P_2(H)}{N(H)H^2} \times \left[\frac{N(H_m)}{P_1(H_m)P_2(H_m)} T(H_m) + \frac{1}{R^*} \int_{H_m}^H \frac{N(h)h^2 g(h) dh}{P_1(h)P_2(h)} \right],$$

где $N(H)$ – лидарные сигналы; $P_1(H)$ и $P_2(H)$ – пропускание атмосферы от лидача до текущей высоты H на длине волны 532 нм (рэлеевские сигналы) и 532 и 607 нм (рамановские сигналы); R^* – универсальная газовая постоянная; $g(h)$ – ускорение свободного падения; H_m – максимальная высота, с которой регистрируются достаточно надежные для обработки сигналы (так называемая высота калибровки, на которой задается значение температуры $T(H_m)$).

Блок-схема лидача для измерения вертикального распределения температуры и вертикальной стратификации аэрозоля представлена на рис. 1.

В качестве излучателя лидача 1 применяется лазер LS-2137U-UV3 – специальная модель серийного лазера LS-2137U на АИГ:Nd³⁺ с электрооптической модуляцией добротности и преобразованием длины волны излучения основной частоты генерации (1064 нм) в излучение второй гармоники (532 нм), работающий в частотном режиме. Основные технические параметры лазера приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные технические параметры лазера LS-2137U-UV3

Параметр	Значение
Энергия в импульсе, мДж	400
Частота посылки импульсов, Гц	10
Длительность импульса на уровне 0,5, нс	≤ 7
Диаметр лазерного пучка, мм	≤ 8
Энергетическая расходимость лазерного излучения по уровню 0,86, мрад	≤ 0,8
Поляризация	линейная
Расходимость луча на выходе, мрад	0,1

Луч лазера направляется в коллиматор 2, и затем коллимированный пучок через плоское зеркало 3 выводится вертикально в атмосферу. Обратнорассеянное излучение поступает на телескоп системы Ньютона 4 с диаметром главного зеркала 1 м и фокусным расстоянием 2 м (табл. 2). В фокальной плоскости телескопа установлена полевая диафрагма 6, предназначенная для формирования поля зрения приемной антенны и выполняющая в конечном счете

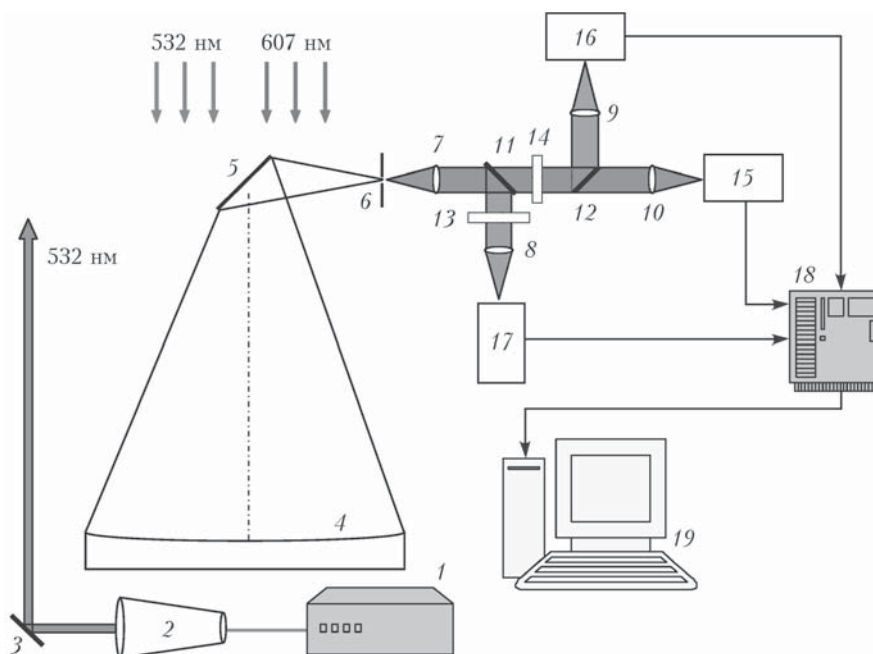


Рис. 1. Структурная схема лидача: 1 – лазер; 2 – коллиматор; 3 – плоское зеркало; 4 – главное параболическое зеркало; 5 – плоский контрортражатель; 6 – диафрагма; 7, 8, 9, 10 – фокусирующие линзы; 11 – дихроичная пластина; 12 – светоделительная пластина; 13, 14 – интерференционные светофильтры; 15, 16, 17 – фотосенсорные модули; 18 – счетчик фотонов; 19 – ПК

Приемная система лидара

Параметр	Значение
Диаметр приемного зеркала, м	1
Фокусное расстояние, м	2
Поле зрения, рад	10^{-3}
Число приемных каналов	3
Принимаемое излучение на длинах волн, нм	355, 532, 607
Интерференционные светофильтры FWHM, нм; пропускание, %	1; 50
Фотодетекторы	R7207-01, H8259-01, H7422P-40 (Hamamatsu)
Квантовая эффективность, %	10–40

пространственную селекцию сигналов. Отфильтрованные от фоновых засветок оптические сигналы направляются в приемный блок, в котором производится их спектральная селекция и фотоэлектронное преобразование. В приемном блоке установлены четыре фокусирующие линзы 7–10, дихроичная пластина 11 для разделения излучений на длинах волн 532 и 607 нм, пластина 12 для разделения излучения на длине волны 532 нм на пучки с примерным процентным соотношением 10 и 90% (уменьшение динамического диапазона при приеме сигналов ближней и дальней зон) и интерференционные светофильтры 13 (532 нм) и 14 (607 нм). Разделенные оптические сигналы по трем отдельным каналам через фокусирующие линзы поступают на фотосенсорные модули 15–17, где преобразуются в электрические сигналы в режиме счета фотонов. Далее производится их регистрация 18 с дальнейшей передачей данных в компьютер 19 для их сбора и накопления.

В лидаре используются фотоприемные модули фирмы Hamamatsu H8259-01, PMT R7207-01 и H7422P-40, обладающие высокой спектральной чувствительностью и быстродействием.

Регистрация одноэлектронных импульсов обратно рассеянного излучения выполняется счетчиком

фотонов PHCOUNT_4, разработанным в ИОА СО РАН, который представляет собой одноплатное устройство на шине USB (rev 2.0). Устройство предназначено для приема сигналов с ФЭУ в компьютер под управлением ОС Win2k, XP. Технические параметры счетчика фотонов представлены в табл. 3.

Зондирование проводится в ночное время суток. Вертикальное разрешение при измерении сигнала (длина строба) составляет 192 м (при этом дискрет по стробу равен 12 м). Единичная серия измерений длится 10 мин, среднее время измерений за ночь составляет ~2 ч. Погрешность зависит от количества принятых фотонов с заданной высоты, которое определяется энергией лазерного импульса, длительностью строба, количеством лазерных выстрелов, концентрацией аэрозоля, плотностью воздуха и фоновыми засветками. Относительные погрешности измерений на высотах 15–50 км даны в табл. 4 (для 30 км приведены погрешности для ближней и дальней зон соответственно).

Для анализа накопленных данных в качестве первичной информации использовался массив лидарных измерений за период 2012–2015 гг., состоящий из 334 суммарных сигналов за отдельные ночи, т.е. данные за 334 ночи, из них 115 в 2012 г., 79 в 2013 г., 67 в 2014 г. и 73 в 2015 г.

Таблица 3

Основные технические характеристики счетчика фотонов PHCOUNT_4

Параметр	Значение
Число каналов	4
Скорость счета, МГц	до 300
Пространственное разрешение (минимум), м	48; 24; 12
Максимальная длина трассы, км	140; 70; 36
Количество отчетов по трассе, К	3

Таблица 4

Относительная погрешность измерений (%) стратификации температуры

Канал	Высота, км						
	15	20	25	30	40	50	
Рэлеевского рассеяния	0,9	2	3,9	10	<1	1,2	3,5
Рамановского рассеяния	2,4	5,5	11				

Результаты исследования температурных аномалий и перехода к фоновому термическому режиму стратосферы

Стратосферное потепление зимы 2011/12 гг.

Результаты измерений вертикального распределения температуры в период зимнего стратосферного потепления 2011/12 гг. представлены в [21, рисунок за декабрь 2011 г.] и на рис. 2.

Потепление началось 26 декабря резким положительным всплеском в протяженной области высот от 30 до 55 км с максимумом до 60 К на высотах 40–45 км. Оно продолжилось в январе, постепенно убывая до конца 2-й декады. Наблюдалась достаточно сильная динамика в поведении вертикального распределения температуры (ВРТ), связанная с изменением высоты стратосферы (опусканием до 30 км), высотной протяженности и интенсивности положительного отклонения. В 3-й декаде января произошло разрушение СП. Просматривается идентичность поведения вертикальных профилей температуры, по-

лученных лидаром и спутником «Аура». В отдельных случаях (графики за 22 и 25 января) отмечается хорошее совпадение лидарных и аэрологических измерений [24]. Согласно данным, взятым с сайта Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды [25], СП 2011/12 гг., наблюдаемое над Томском, относилось к минорному типу и не сопровождалось перестройкой циркуляции стратосферы.

После разрушения СП в начале марта произошел новый всплеск потепления [21, рисунок за март 2012 г.]; он наблюдался в расширенном интервале высот от 20 до 45 км и продолжался в течение 1-й декады месяца. Максимальная амплитуда достигла 40 К на высотах 30–35 км (график за 1 марта). Положительные отклонения температурных профилей от модели были также зарегистрированы в измерениях со спутника «Аура» (графики за 1, 4 и 5 марта), хотя и несколько меньшие, чем в лидарных данных. Разница могла возникнуть из-за пространственно-временной разнесенности наблюдений.

Во 2-й половине марта ВРТ стабилизировалось, что видно из сближения лидарного и модельного профилей температур. Однако в конце месяца произошло очередное возмущение, которое было зарегистрировано также спутником «Аура». Спорадически

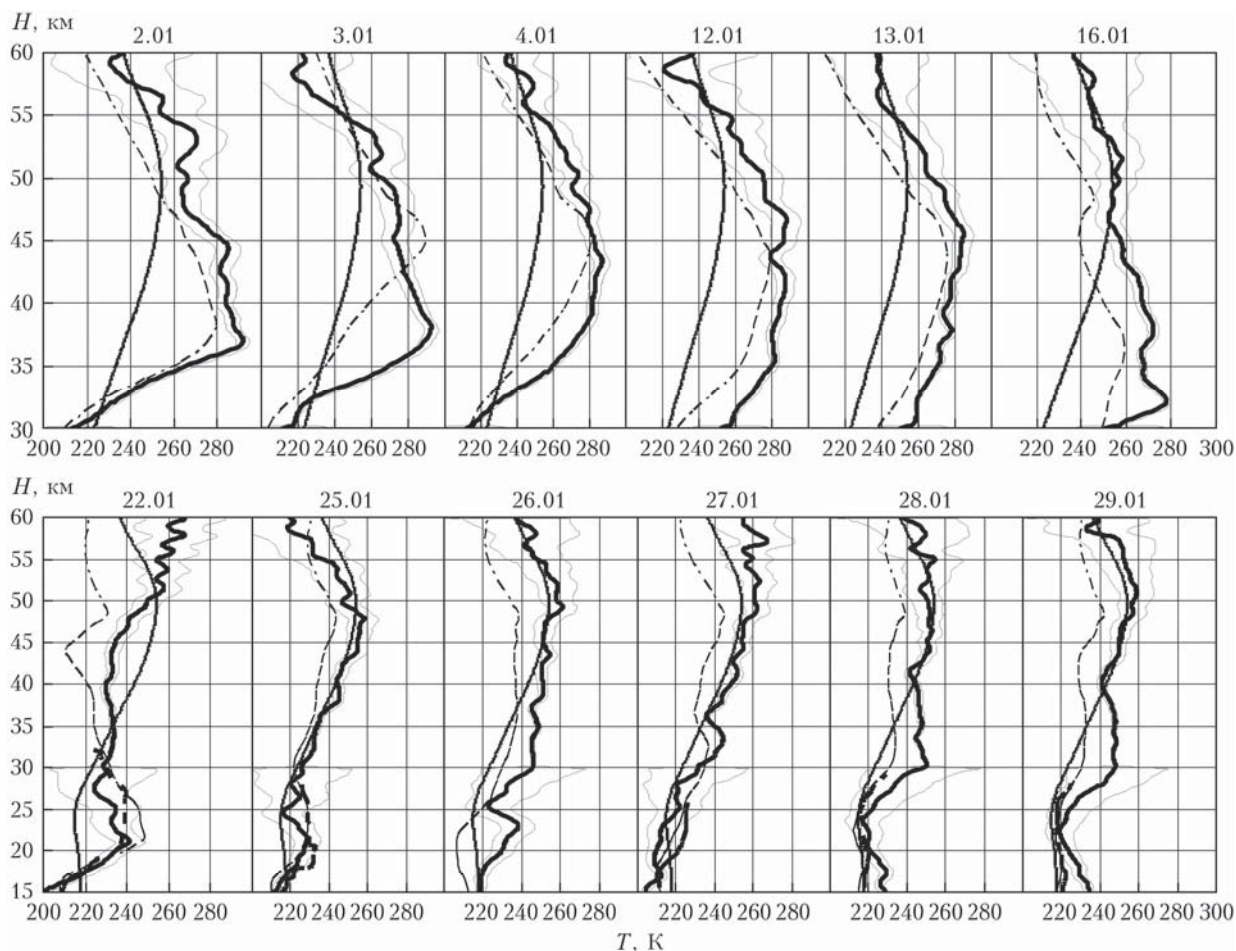


Рис. 2. Проявление и разрушение СП в январе 2012 г.: лидарные профили температуры (сплошная полужирная кривая) с их стандартным отклонением (тонкая серая кривая), модельные профили CIRA-86 [22] (тонкая черная кривая) и профили температуры, полученные со спутника «Аура» [23] (штрихпунктирная кривая)

возникали локальные по высоте очаги температурного возмущения в апреле и с убывающей интенсивностью в мае.

Измерения летнего периода [21, рисунок за июнь–август 2012 г.] показывают, что термический режим стратосферы стабилизировался. Лидарные профили температуры, как и профили «Аура», следуют модельному распределению CIRA-86. Особенно хорошее совпадение всех профилей для наблюдений за июнь отмечается в верхней стратосфере, а за июль – во всем слое стратосферы.

В августе ВРТ продолжает оставаться стабильным в верхней стратосфере. В нижней стратосфере на высотах от 20 до 33 км начиная с 13 августа наблюдаются некоторые очаги потепления, которые продолжают устойчиво проявляться в течение сентября. В октябре область потепления распространяется вверх и достигает уровня 45 км. Положительное отклонение температуры в этих очагах потепления не превышает 20 К [21, рисунок за сентябрь–октябрь 2012 г.].

В ноябре из-за облачной погоды измерения не проводились. Данные за декабрь из обработки были исключены по причине сильного ослабления сигналов, вызванного дымкой и аэрозольными слоями в тропосфере.

Стратосферное потепление зимы 2012/13 гг.

Результаты лидарных наблюдений СП января 2013 г. приведены на рис. 3. Здесь же для сравнения показаны среднемесячный профиль модели CIRA-86 и профили по данным синхронных наблюдений со спутника «Аура».

Стратосферное потепление было замечено вечером 1 января 2013 г. как по лидарным, так и по спутниковым наблюдениям, которые находятся в хорошем согласии. Появился очаг «теплого» слоя воздуха с максимальным отклонением около 65 К на высоте 30 км. Поскольку лидарные измерения не всепогодны и невозможны в условиях облачной атмосферы (наблюдения с 26 по 31 декабря не проводились), то отслеживание периода, предшествующего обнаружению СП лидаром, по измерениям спутника «Аура», показало, что его начало пришлось на 25 декабря и СП проявилось в верхней стратосфере на высоте 55 км.

Возвратимся опять к лидарным наблюдениям. На рис. 3 отчетливо видно, что максимальное развитие СП пришлось на 1 января 2013 г. и продолжилось с некоторым спадом мощности 3 и 4 января.

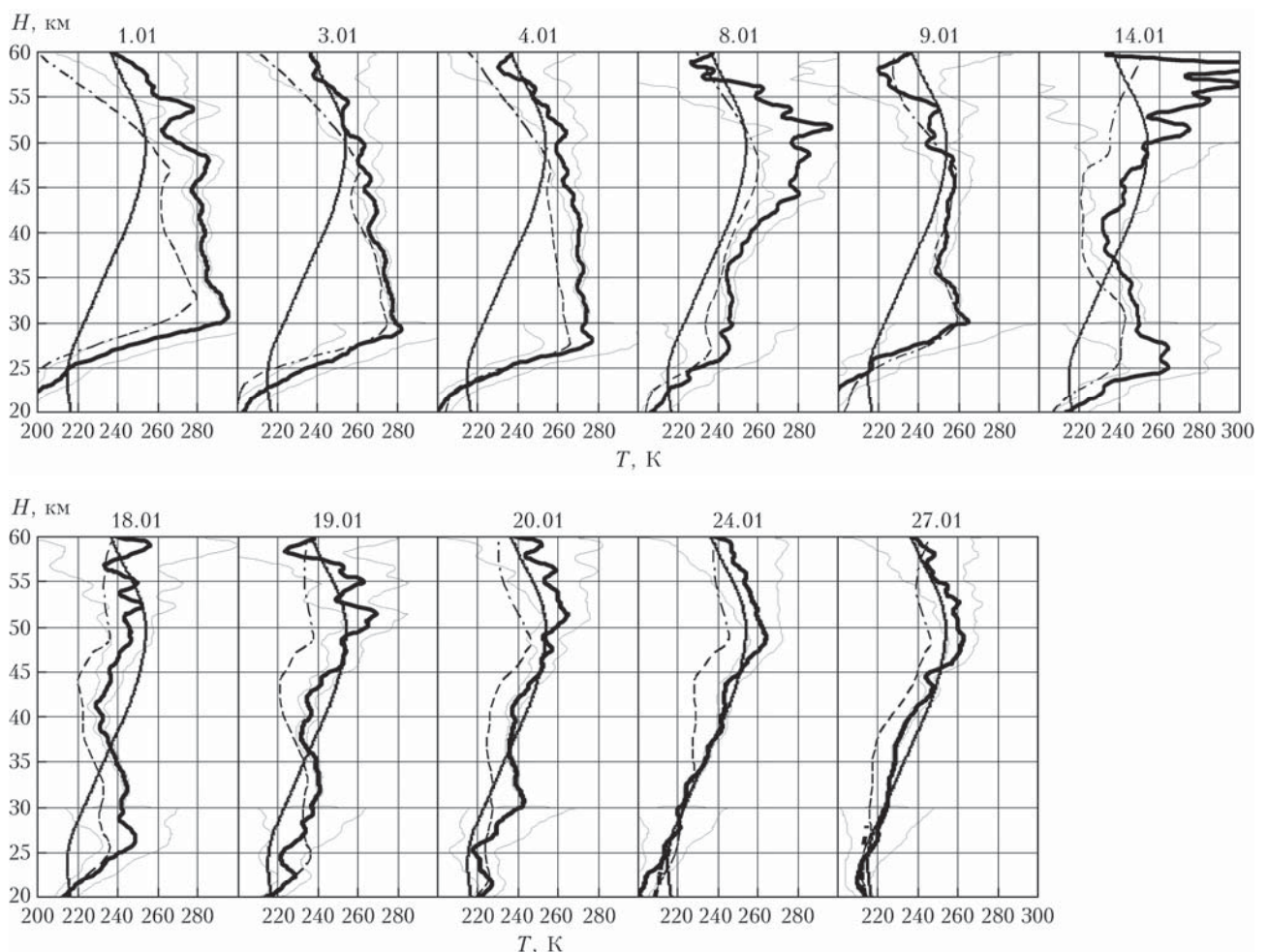


Рис. 3. Лидарные наблюдения СП в январе 2013 г. Обозначения те же, что и для рис. 2

В последующий период лидарных наблюдений 8–18 января происходило разрушение СП с выраженной динамикой: остатки СП окончательно исчезли в последней декаде января.

По результатам анализа разрезов скорости зонального ветра [25] выяснено, что СП зимы 2012/13 гг. относится к мажорному типу: циркуляция воздушных масс в верхней стратосфере над Томском изменила направление с западного на восточное (рис. 4).

Вертикальные распределения температуры в выборочные ночи последующих месяцев года, полученные по данным лидарных измерений, показаны в [21, рисунок за февраль–декабрь 2013 г.] в срав-

нении со спутниковыми наблюдениями и модельным распределением. Так, картина ВРТ в феврале достаточно динамичная. В первых числах месяца выше 30 км лидарный профиль температуры совпадает с модельным, а профиль «Аура» имеет отрицательное отклонение относительно модельного в диапазоне высот от 20 до 50 км; 8 февраля лидарный профиль и профиль «Аура» в области высот 30–45 км сдвинуты в отрицательную сторону. Во 2-й декаде февраля происходит перестройка распределения температуры, а в начале 3-й декады как лидаром, так и спутником регистрируется очаг потепления в верхней стратосфере. Вместе с тем некоторое

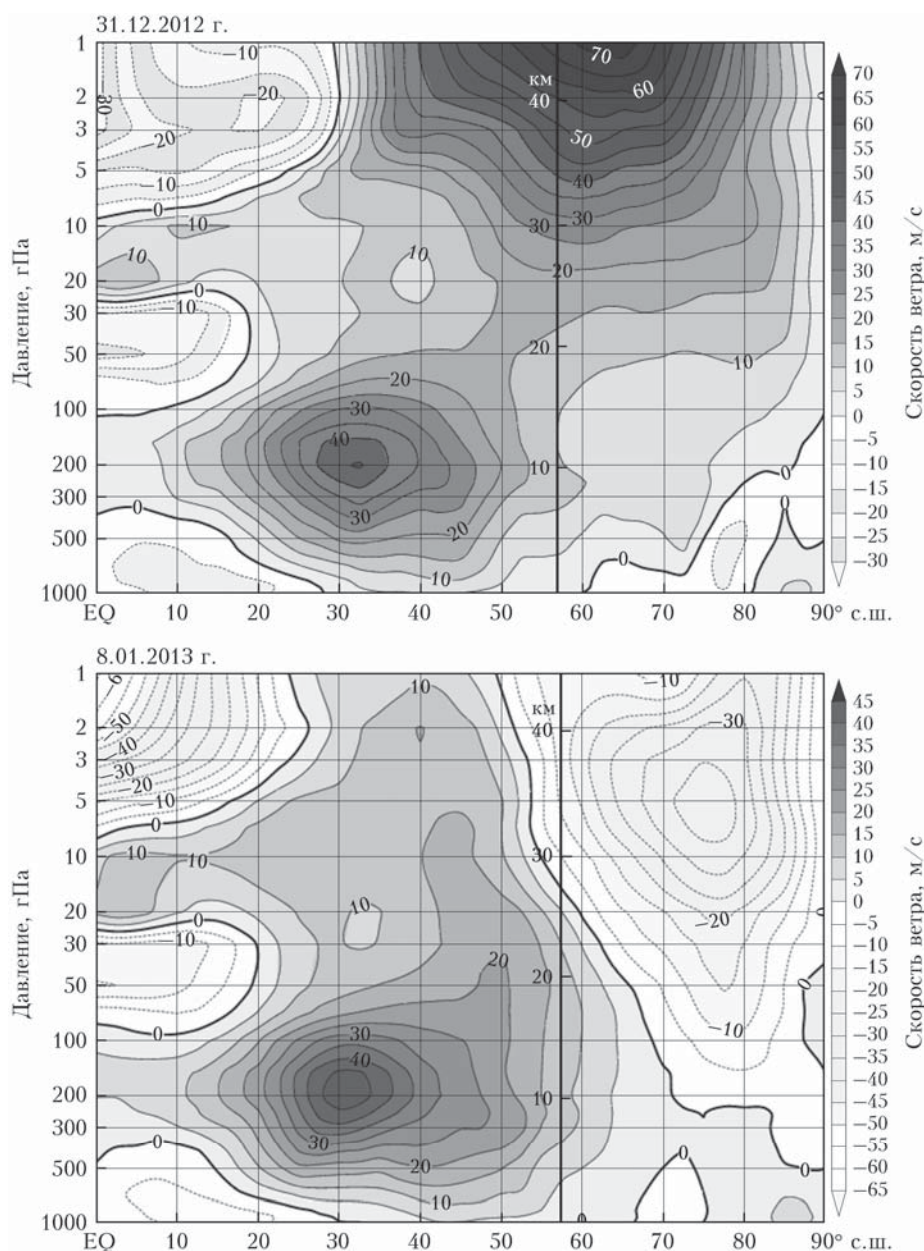


Рис. 4. Последствия проявления СП зимы 2012/13 гг. Произошло мажорное СП, приведшее к перестройке циркуляции верхней стратосферы с западного переноса (положительные изолинии) на восточный (отрицательные изолинии). Высотные разрезы скорости зонального ветра до СП и после представлены на верхнем и нижнем рисунках; вертикальная полужирная линия – широта Томска

локальное потепление в нижней стратосфере по лидарным измерениям наблюдается в течение всего месяца. С марта начинается процесс стабилизации ВРТ, и с мая по сентябрь вертикальные профили температуры, полученные из лидарных и спутниковых измерений, хорошо согласуются с модельным. Заметные возмущения в ВРТ в виде положительных температурных отклонений от среднемесячных значений в протяженной области высот от 20 до 45 км начинают регистрироваться уже в октябре и продолжают — в ноябре—декабре.

Стратосферное потепление зим 2013/14 и 2014/15 гг.

В отличие от 2013 г., из-за плохих погодных условий (облачность) не удалось проследить особенности проявления зимнего СП 2014 г. В декабре 2013 г. были проведены два измерения температурных профилей, в январе 2014 г. — всего одно измерение, в феврале 2014 г. — четыре. В данных измерениях стратосферное потепление замечено не было. Если обратиться к температурным данным спутника «Аура» [23], то можно сделать вывод, что СП над Томском происходило в последней декаде декабря — 1-й декаде января и относилось, в отличие от СП 2013 г., к минорному типу. Потепление наблюдалось на высотах от 45 до 55 км с максимальными положительными отклонениями температуры от среднемесячных значений 25–40 К. Выборочные профили температуры с наиболее характерными для месяцев распределения по данным наблюдений за 2014 г. приведены в [21, рисунок за февраль—сентябрь 2013 г.].

В отдельные дни января и февраля как лидарные, так и спутниковые измерения показывали некоторое потепление с положительной амплитудой до 20 К. В марте потепление усилилось. Так, 24 и 31 марта оно охватило область высот от 20 до 45 км и его максимальное положительное отклонение составило 40 К на высоте 30–35 км. В апреле происходил медленный спад потепления, 20 и 26 мая

оно практически размылось. В июне—сентябре ВРТ с некоторыми незначительными локальными неоднородностями соответствовало среднемесячному модельному распределению. Очередное возмущение термического состояния стратосферы было замечено во 2-й декаде ноября.

Стратосферное потепление зимы 2014/15 гг. было довольно длительным. По лидарным наблюдениям его начало было зарегистрировано 10 ноября 2014 г. (рис. 5). Наибольшего развития СП достигло 27 ноября и охватило интервал высот от 30 до 55 км с максимальным положительным отклонением температуры от среднемесячного значения до 60 К на высоте 35 км. Это потепление также было отмечено в измерениях спутника «Аура» с несколько меньшими положительными отклонениями температуры.

В декабре 2014 г. лидарные и спутниковые наблюдения показали стратосферное потепление в начале (3 декабря) и конце (24 декабря) месяца в аналогичном интервале высот 30–55 км (рис. 6).

Следующее СП началось в конце января 2015 г. и продолжалось до конца 2-й декады февраля [21, рисунок за февраль 2015 г.]. Согласно лидарным и спутниковым данным, пик его развития пришелся на начало февраля. Потепление охватило обширную область высот от 20–30 до 50 км. Максимальное положительное отклонение температуры превысило 65 К на высотах 40–45 км (5 февраля 2015 г.). Это было одно из самых длительных СП, зарегистрированных в лидарных наблюдениях над Томском начиная с 1996 г.; оно продолжалось почти месяц.

Стратосферное потепление 2014/15 гг. относится к минорному типу, так как в стратосфере не происходило изменения направления переноса воздушных масс с западного на восточное. На это указывают данные, взятые с сайта Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды [25], для всех дней лидарных наблюдений. Для примера на рис. 7 приведено высотное распределение направления и скорости зонального ветра. Видно, что направление ветра над Томском неизменно оставалось западным во всем интервале высот от 0 до 50 км.

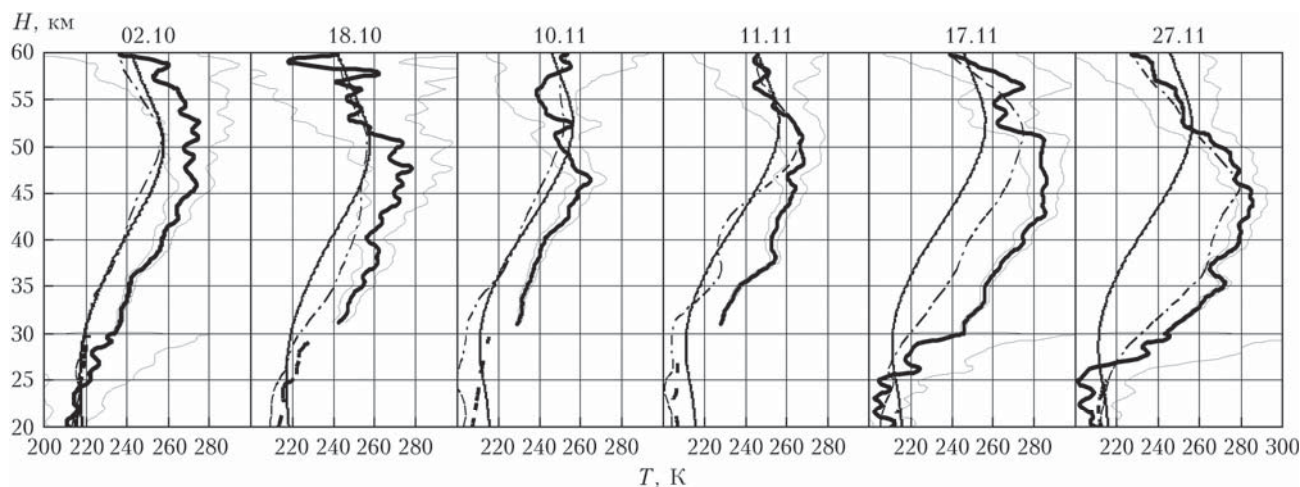


Рис. 5. Вертикальные профили температуры, полученные над Томском из лидарных и спутниковых измерений в октябре—ноябре 2014 г. Обозначения те же, что и для рис. 2

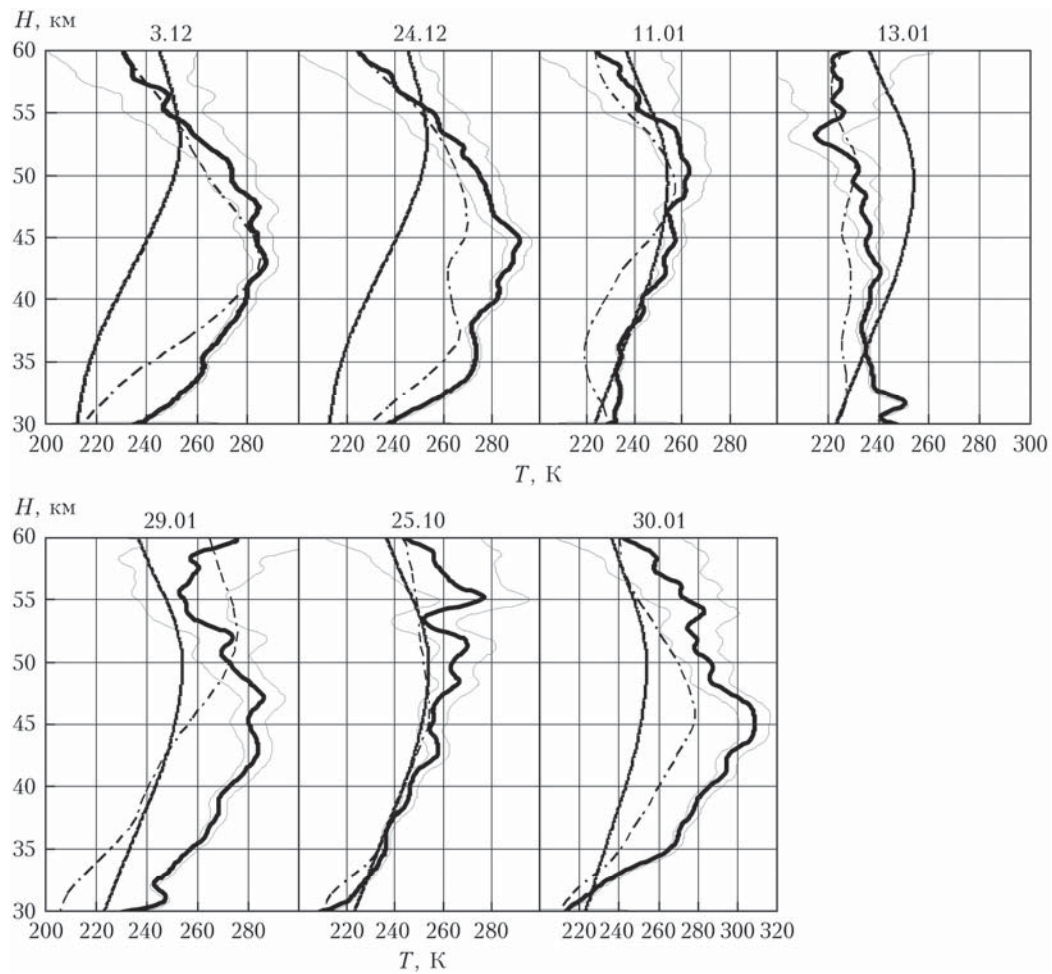


Рис. 6. Лидарные и спутниковые наблюдения проявления СП в декабре 2014 г. и январе 2015 г. Обозначения те же, что и для рис. 2

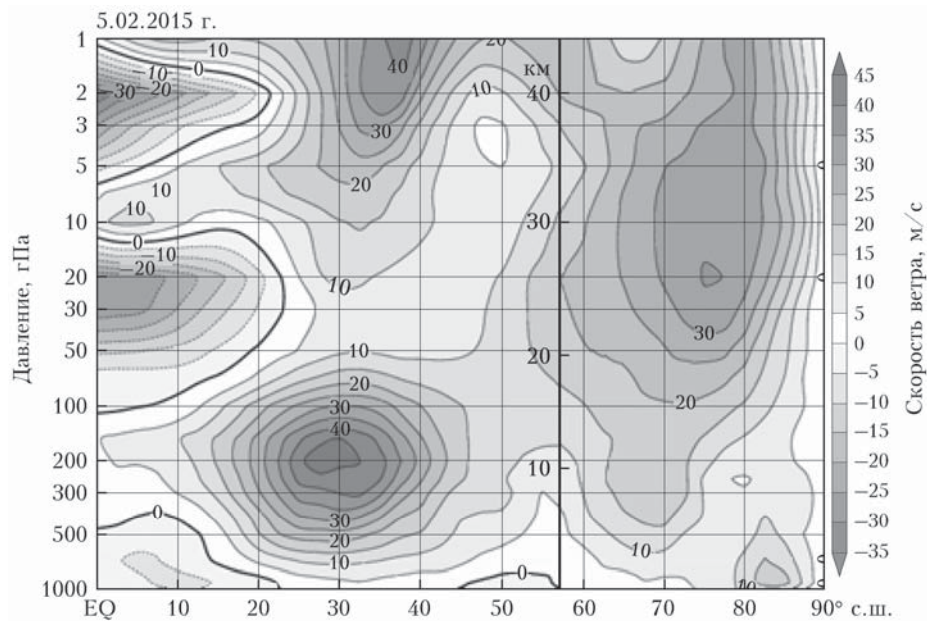


Рис. 7. Высотное распределение направления и скорости зонального ветра Северного полушария, зарегистрированного 5 февраля 2015 г. Вертикальная полужирная линия – широта Томска

Несмотря на минорный тип потепления, его последствия носили затяжной характер. Следы СП продолжали устойчиво наблюдаться в протяженном слое от 20–25 до 50 км в марте и с некоторым спадом по интенсивности в апреле [21, рисунок за март–ноябрь 2015 г.]. Релаксация ВРТ началась только в мае и закончилась в июне. В июне–августе наблюдалось стабильное вертикальное распределение температуры, соответствующее среднемесячному модельному. Очередные аномалии термического режима в виде положительных сдвигов профилей температуры по отношению к модельному в нижней стратосфере начали проявляться в сентябре.

Заключение

На основании накопленного экспериментального материала, полученного по результатам лидарного зондирования атмосферы над Томском в 2012–2015 гг., а также за предшествующий период (2008–2011 гг. [12, 13]), установлен ряд особенностей внутригодовой динамики термического режима стратосферы.

Зимнее стратосферное потепление происходит ежегодно. За указанный период было зарегистрировано два сильных (мажорных) потепления в 2009/10 и 2012/13 гг., при которых в верхней атмосфере сменилось направление переноса воздушных масс с западного на восточное, и четыре слабых (минорных) – в 2010/2011, 2011/12, 2013/14 и 2014/15 гг. Из всех СП следует выделить два. Первое – СП зимы 2009/10 гг., как самое мощное стратосферное потепление, отмеченное за весь опыт лидарных наблюдений над Томском с 1996 г. Оно началось в 20-х числах января и завершилось в конце февраля. В фазе развития данного СП температура в стратосфере в отдельные ночи поднималась до 308 К, 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, т.е. процесс похолодания в мезосфере сопровождался потеплением в стратосфере. В фазе разрушения СП, длящейся с конца января и весь февраль, уровень стратосферы падал до рекордно низких высот 25 км.

Второе – СП зимы 2014/15 гг., как самое длительное потепление. Оно началось в первых числах ноября, максимумы его развития регистрировались в ноябре, январе и феврале с положительными амплитудами 40–55 К, спад начался в марте и разрушение произошло в апреле. Высота стратосферы не опускалась ниже 40 км. Примечателен тот факт, что по высотной протяженности СП охватывало весь слой стратосферы.

На результатах многолетних наблюдений показано, что в Западной Сибири для длительного периода года (апрель–ноябрь) вертикальное распределение температуры в подавляющем большинстве случаев хорошо согласуется с модельным распределением CIRA-86.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № НШ-8199.2016.5 и гранта РФФИ № 16-05-00901.

1. Barnett J.J., Labitzke K. Planetary waves // Handbook for MAP. 1985. V. 16. P. 138–143.
2. Хромов С.П., Мамонтова Л.И. Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 568 с.
3. Атмосфера. Справочник. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 510 с.
4. Matsuno T. A dynamical model of stratospheric sudden warming // J. Atmos. Sci. 1971. V. 28. P. 1479–1494.
5. Pal S.R., Carswell A.I., Bird J., Donovan D.P., Duck T.J., Whiteway J.A. Lidar measurements of the stratosphere at the Eureka and Toronto NDSC stations // Proc. SPIE. 1996. V. 2833. P. 28–39.
6. Whiteway J.A., Duck T.J., Carswell A.I. Measurements of gravity wave activity within and around the Arctic stratospheric vortex // Geophys. Res. Lett. 1997. V. 24. P. 1387–1390.
7. Кокина Г.А., Гайгеров С.С. Метеорология верхней атмосферы земли. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 270 с.
8. Холтон Дж.Р. Динамическая метеорология стратосферы и мезосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 224 с.
9. Гайгеров С.С., Жорова Э.Д. Термический режим и циркуляция в средней атмосфере // Метеорол. и гидрол. 1986. № 7. С. 5–10.
10. Маричев В.Н. Лидарные наблюдения зимних стратосферных потеплений над Томском в 1996–2000 гг. // Метеорол. и гидрол. 2001. № 8. С. 41–48.
11. Куркин В.И., Черниговская М.А., Маричев В.Н., Николашкин С.В., Бычков В.В. Особенности проявления зимних внезапных стратосферных потеплений в период 2008–2010 гг. над регионами Сибири и Дальнего Востока России по данным лидарных и спутниковых измерений температуры // Солнечно-земная физика. 2011. № 17. С. 166–173.
12. Маричев В.Н. Лидарные исследования проявления стратосферных потеплений над Томском в 2008–2010 гг. // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 5. С. 386–391.
13. Маричев В.Н. Исследование особенностей проявления зимних стратосферных потеплений над Томском по данным лидарных измерений температуры в 2010–2011 гг. // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 12. С. 1041–1046.
14. Николашкин С.В., Титов С.В., Маричев В.Н., Бычков В.В., Куркин В.И., Черниговская М.А., Непомнящий Ю.А. Лидарные исследования поведения внезапных зимних стратосферных потеплений на территории Сибири и Дальнего Востока // Наука и образование. 2013. Т. 69, № 1. С. 10–17.
15. Бобровников С.М., Горлов Е.В., Жарков В.И. Экспериментальная оценка чувствительности СКР-лидара при использовании среднего УФ-диапазона длин волн // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 1. С. 70–74; Bobrovnikov S.M., Gorlov E.V., Zharkov V.I. Experimental estimation of Raman lidar sensitivity in the middle UV // Atmos. Ocean. Opt. 2013. V. 26, N 4. P. 320–325.
16. Маричев В.Н., Матвиенко Г.Г., Лисенко А.А., Илюшик В.Ю., Куликов Ю.Ю., Красильников А.А., Рыскин В.Г., Бычков В.В. Первые результаты комплексного эксперимента по зондированию средней атмосферы в оптическом и миллиметровом диапазонах волн (над г. Томском) // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 12. С. 1091–1095; Marichev V.N., Matvienko G.G., Lisenko A.A., Ilushik V.Yu., Kulikov Yu.Yu., Krasilnikov A.A., Ryskin V.G., Bychkov V.V. First results of an integrated experiment on sounding the middle atmosphere in optical and millimeter wavelength ranges (over Tomsk) // Atmos. Ocean. Opt. 2013. V. 26, N 3. P. 222–226.
17. Маричев В.Н., Матвиенко Г.Г., Лисенко А.А., Бочковский Д.А., Куликов Ю.Ю., Красильников А.А.,

- Рыскин В.Г., Демкин В.М.* Микроволновые и оптические наблюдения озона и температуры средней атмосферы во время стратосферного потепления в Западной Сибири // *Оптика атмосф. и океана*. 2014. Т. 27, № 1. С. 46–52; *Marichev V.N., Matvienko G.G., Lisenko A.A., Bochkovsky D.A., Kulikov Yu.Yu., Krasilnikov A.A., Ryskin V.G., Demkin V.M.* Microwave and optical observations of ozone and temperature of the middle atmosphere during stratospheric warming in Western Siberia // *Atmos. Ocean. Opt.* 2014. V. 27, N 6. P. 499–505.
18. *Маричев В.Н.* Комбинированный метод оптического зондирования нижней и средней атмосферы // *Оптика атмосф. и океана*. 2016. Т. 29, № 3. С. 210–215; *Marichev V.N.* Combined method for optical sensing of the lower and middle atmosphere // *Atmos. Ocean. Opt.* 2016. V. 29, N 4. P. 348–352.
 19. *Бочковский Д.А., Виролайн Я.А., Куликов Ю.Ю., Маричев В.Н., Поберовский А.В., Рыскин В.Г., Тимофеев Ю.М.* Наземный микроволновый мониторинг содержания озона в средней атмосфере над Петергофом и Томском во время стратосферного потепления зимой 2013–2014 годов // *Изв. вузов. Радиофиз.* 2016. Т. LIX, № 4. С. 299–306.
 20. *Кориунов В.А., Зубачев Д.С.* Определение параметров волновых возмущений средней атмосферы по данным лидарных измерений // *Оптика атмосф. и океана*. 2015. Т. 28, № 11. С. 993–1002; *Korshunov V.A., Zubachev D.S.* Determining the parameters of wave disturbances of the middle atmosphere from lidar measurements // *Atmos. Ocean. Opt.* 2016. V. 29, N 2. P. 152–161.
 21. URL: <http://sky.iao.ru/?content=msvza> (last access: 9.03.2017).
 22. *Rees D., Barnett J.J., Labitske K.* COSPAR International reference atmosphere: 1986. Part II, Middle atmosphere models // *Adv. Space Res.* 1990. V. 10, N 12. 525 p.
 23. URL: <http://mirador.gsfc.nasa.gov> (last access: 9.03.2017).
 24. URL: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> (last access: 9.03.2017).
 25. URL: <http://users.met.fu-berlin.de/~Aktuell/stratwww/wdiag/eczm.php?alert=8&forecast=all&var=u&lng=eng#fig1> (last access: 9.03.2017).

V.N. Marichev, D.A. Bochkovsky. Lidar studies of the thermal regime of the stratosphere over Tomsk during the period 2012–2015.

The temperature vertical distributions over Tomsk in disturbed and quiet periods of the year over 2012–2015 are analyzed. The experimental material accumulated show some features of the annual dynamics in the thermal regime of the stratosphere. Thus, the winter stratospheric warming occurs annually. During the period specified, there was one strong (major) warmings, in winters 2012/13, when air mass transport in the upper atmosphere changed from the western to the eastern, and three weak (minor) warmings, in winters 2011/12, 2013/14, and 2014/15. Based on long-term observations, it is shown that the temperature vertical distribution for Western Siberia is in a good agreement with the CIRA-86 model distribution in the majority of cases throughout a long period of the year (from April to November).