

УДК 551.524.7, 551.510.532

**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**

¹В.И. Куркин, ¹М.А. Черниговская, ²В.Н. Маричев, ³С.В. Николашкин, ⁴В.В. Бычков

**EFFECTS OF WINTER SUDDEN STRATOSPHERIC WARMINGS OVER SIBERIA
AND RUSSIAN FAR EAST IN 2008-2010 AS DEDUCED FROM LIDAR
AND SATELLITE MEASUREMENTS OF TEMPERATURE**

¹V.I. Kurkin, ¹M.A. Chernigovskaya, ²V.N. Marichev, ³S.V. Nikolashkin, ⁴V.V. Bychkov

В работе исследуются возмущения температурного режима средней атмосферы Земли, связанные с событиями внезапных стратосферных потеплений, наблюдавшихся в январе–феврале 2008–2010 гг. над регионами Западной, Восточной Сибири и Дальнего Востока России. Для анализа используются данные о вертикальном распределении температуры в верхней тропосфере и стратосфере, полученные с помощью лидарных измерений над регионами городов Томска, Якутска и с. Паратунка Камчатского края. Для комплексного анализа пространственно-временного распределения температуры средней атмосферы совместно с данными лидарных измерений используются спутниковые данные по температуре, полученные СВЧ-зондом MLS «Aura». Рассматриваются региональные особенности внезапных стратосферных потеплений над азиатским регионом России в долготном секторе $\sim 85\div 160^\circ$ E в периоды зим 2008–2010 гг.

This paper analyses disturbances of the Earth's middle atmosphere temperature regime associated with sudden stratospheric warmings observed over West, East Siberia and Russian Far East in January–February of 2008–2010. The analysis rests on data on vertical temperature distribution in the upper troposphere and stratosphere obtained from lidar measurements over Tomsk, Yakutsk and Paratunka, the Kamchatka Krai. For the complex analysis of the spatial-temporal temperature distribution in the middle atmosphere, the lidar measurement data are exploited along with satellite data on temperature acquired by “Aura” Microwave Limb Sounder (MLS). This paper addresses regional effects of sudden stratospheric warmings over the Asian region of Russia in the longitudinal sector of $\sim 85\div 160^\circ$ E during winters of 2008–2010.

Введение

В работе выполнено комплексное исследование возмущений температурного режима средней атмосферы Земли, связанных с событиями внезапных стратосферных потеплений (ВСП), наблюдавшихся в январе–феврале 2008–2010 гг. над регионами Западной, Восточной Сибири и Дальнего Востока России.

Несмотря на то, что зимние стратосферные потепления были открыты еще в 1952 г., они до сих пор не изучены до конца. Накопленный за более чем полувековой период значительный статистический материал указывает на важную роль ВСП в формировании термодинамических особенностей в тропосфере, стратосфере и даже в верхней атмосфере и ионосфере, а также в вариациях озонового слоя Земли в зимний период [Хргиан, 1969; Погосян, 1972; Кокина, Гайгеров, 1981, Labitzke, Loon, 1999]. Стратосферные потепления – это сильные и внезапные повышения температуры «взрывного» характера на десятки градусов в зимней стратосфере в течение нескольких суток, сопровождающиеся опусканием значительной области стратосферы на 10–30 км [Хромов, Мамонтова, 1974]. Как следует из результатов наблюдений, ВСП происходят почти каждый зимний сезон в стратосфере Арктики [Manney et al., 2005; 2009; Labitzke, Kunze, 2009; Narada et al., 2010] и значительно реже в Антарктике [Nishii, Nakamura, 2004; Eguchi, Kodera, 2007]. Однако влияние ВСП на динамику не ограничивается только полярными регионами, а может быть обнаружено в средних [Flury et al., 2009] и даже в низких широтах [Kodera, 2006; Eguchi, Kodera, 2007].

К настоящему времени установлен целый ряд геофизических явлений, влияющих на формирование особенностей стратосферной циркуляции во время арктических зим, приводящих затем к воз-

никновению стратосферных потеплений [Labitzke, Loon, 1999; Labitzke, Kunze, 2009]. Основной причиной зимних ВСП считается влияние крупномасштабных возмущений в тропосфере (т. е. механизм воздействия снизу), а именно волновых атмосферных возмущений – планетарных волн, возникающих из-за термической неоднородности поверхности Земли. Орография и температурные градиенты между океаном и материком становятся причиной формирования длинных (с волновыми числами 1 и 2) волн Россби в тропосфере. Эти волны распространяются из тропосферы в стратосферу. Динамическое взаимодействие планетарных волн с зональным течением на высотах стратосферы может приводить к их затуханию и, как следствие, к повышению температуры и развитию ВСП [Matsuno, 1971; Монин, 1982; Mohanakumar, 2008; Labitzke, Kunze, 2009]. На формирование ВСП также могут оказывать влияние квазидвухлетние колебания (КДК) зонального ветра в экваториальной стратосфере; Южное колебание (ЮК) в тропиках, связанное с явлением Эль-Ниньо, влияющее на стратосферный полярный вихрь, а также 11-летний цикл солнечной активности, который, в свою очередь, влияет на КДК и, возможно, на ЮК. В [Nishii, Nakamura, 2004; Peters et al., 2007; 2010] авторы отмечают, что вклад в возникновение ВСП могут также вносить волновые процессы, возникающие в регионах с сильной конвекцией в тропиках, способные достичь средних и высоких широт и привести к усилению антициклонов в тропосфере.

Обсуждая механизмы возникновения ВСП, следует, однако, отметить, что в научной литературе существуют и другие точки зрения на механизмы развития зимних ВСП, например, озono-радиационный разогрев стратосферы в результате гелиогеофизических возму-

щений, т. е. механизм воздействия сверху [Хргиан, 1969; Погосян, 1972; Кокина, Гайгер, 1981].

ВСП называют сильным (типа «major» по определению Всемирной метеорологической организации), если на уровне 10 гПа происходит обращение меридионального градиента температуры и связанное с этим обращение направления зонального ветра с западного на восточное между 60° N и полюсом [Labitzke, 1981; Labitzke, Kunze, 2009]. Потоки тепла к полюсу во время ВСП создают среднее течение к югу, сила Кориолиса поворачивает его на запад, и оно тормозит обычный для зимней стратосферы западный ветер в случае слабых ВСП (типа «minor»), а в случае сильных ВСП (типа «major») меняет направление зонального ветра на восточное. Слабое потепление может быть сравнительно интенсивным по диапазону повышения температуры на стратосферных высотах, но оно не приводит к обращению зональной циркуляции.

В настоящее время не существует надежных методов прогноза возникновения ВСП и механизмы межгодовой изменчивости ВСП остаются неизвестными. Результаты анализа ВСП в Арктике показали [Manney et al., 2005], что с 1991/92 по 2002/03 гг. отмечалось увеличение количества ВСП типа «major» (семь потеплений за шесть лет), при этом четыре из семи ВСП наблюдались необычайно рано – в декабре или начале января. Причины изменения частоты и времени наступления ВСП не установлены.

В работе [Labitzke, Kunze, 2009] авторы также подчеркивают большую межгодовую изменчивость температурного режима стратосферы зимой над Арктикой. На основе анализа данных за более чем 60 зим была изучена межгодовая изменчивость термодинамического режима стратосферы с целью понимания механизмов его формирования и рассмотрения возможности прогноза типа наступающей зимы (относительно явлений, происходящих в стратосфере, а также в тропосфере). На основе накопленного статистического материала, учитывая совокупность всех сопутствующих факторов, авторы отмечают, что зиму 2008/09 гг. можно было прогнозировать со стабильным холодным стратосферным полярным вихрем в течение всей зимы. Но этот прогноз совершенно не оправдался, поскольку в действительности зимой 2008/09 гг. наблюдалось одно из самых сильных по интенсивности и продолжительности ВСП за всю историю экспериментальных наблюдений [Manney et al., 2009; Labitzke, Kunze, 2009; Harada et al., 2010].

В последние годы интерес к исследованиям ВСП обусловлен также появлением публикаций [Kodera et al., 2008; Deng et al., 2008 и др.], показавших возможное влияние ВСП на циркуляцию тропосферы и, в частности, на формирование аномальных погодных условий. Обзор некоторых таких последствий ВСП представлен в [Варгин и др., 2010].

По-прежнему остается сложной и не решенной до конца задача воспроизведения ВСП в моделях циркуляции атмосферы. Например, модели (с хорошим описанием стратосферы) могут достаточно адекватно воспроизводить отдельные ВСП, но частота их возникновения в моделях меньше, чем по данным экс-

периментальных наблюдений [Charlton et al., 2007].

Перечисленные выше факты свидетельствуют о том, что изучение событий ВСП (и в целом температурного режима атмосферы) актуально и в настоящее время. В связи с этим особенно важным является вопрос о методах дистанционного измерения температуры атмосферы на высотах стратосферы и выше, где измерения температуры атмосферного газа контактными методами неприменимы.

В настоящее время глобальный мониторинг температуры проводится в рамках международной программы NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change), выполняемой всемирной сетью, включающей более 70 станций наземного базирования (лидары, радары, радиометры, спектрофотометры, интерферометры), а также мощной спутниковой группировкой. Цель этой программы состоит в наблюдении и исследовании физико-химического состояния стратосферы и верхней тропосферы, а также в оценке влияния изменений в стратосфере на нижележащую атмосферу и глобальный климат. Составной частью программы NDACC являются измерения с помощью 27 наземных лидарных станций, расположенных в основном в Европе и Северной Америке.

К настоящему времени лидары нашли широкое применение в исследованиях температурного режима средней атмосферы. Во-первых, это связано с невозможностью или проблематичностью использования на этих высотах традиционных средств измерений (радиозонды выше 30 км практически не долетают, исследования же с помощью метеорологических ракет слишком дороги для обеспечения мониторингового режима) и, во-вторых, со значительным лучшим высотным и временным разрешением по сравнению со спутниковыми наблюдениями. Данные лидарных измерений температуры активно используются для исследования событий ВСП [Labitzke, 1999]. Например, в [Charyulu et al., 2007] приведены результаты статистического анализа за 20-летний период (1981/82–2000/01 гг.) событий ВСП, наблюдавшихся в обсерватории Верхнего Прованса (44° N, 6° E, юг Франции) с помощью квазинепрерывных лидарных ночных измерений температуры. Всего были идентифицированы 43 события ВСП, т. е. стратосферные потепления происходили со средней частотой 2.15 события в зимний сезон. Из 20 последовательных зим ВСП типа «major» отмечались в течение 8 зим, ВСП типа «minor» – в течение 17 зим, а именно 10 событий (~23 %) – ВСП типа «major» и 33 события (~77 %) – ВСП типа «minor». Амплитуды повышения температуры стратосферы для ВСП типа «major» находились в диапазоне 35.7–12.2 К, а для ВСП типа «minor» – 32.8–10.2 К.

В Институте оптики атмосферы (ИОА СО РАН, Томск) лидарные наблюдения за вертикальным распределением температуры в стратосфере были начаты в 1994 г. и продолжаются до настоящего времени. В 2004–2007 гг. эти наблюдения были поддержаны лидарными пунктами Якутска (ИКФИА СО РАН) и Петропавловска-Камчатского (с. Паратунка, ИКИР ДВО РАН), созданными при помощи ИОА СО РАН. Силами этих лидарных обсерваторий осуществляется мо-

нитинг над регионами Сибири и Дальнего Востока в режиме регулярных измерений стратосферных аэрозоля и температуры.

Наземные методы зондирования атмосферы дают лишь порядка четверти объема информации, необходимой для метеорологического и климатического прогноза погоды [Кондратьев, Тимофеев, 1978], оставляя почти неохваченными обширные океанические, приполярные и горные районы, поэтому наряду с наземными методами важнейшую роль играет зондирование атмосферы с помощью искусственных спутников Земли, дающих возможность сбора информации над всеми регионами земного шара.

Анализируемые данные

В работе проведено исследование возмущений температурного режима средней атмосферы Земли, связанных с событиями ВСП, которые наблюдались в январе–феврале с 2008 по 2010 г. над регионами Западной, Восточной Сибири и Дальнего Востока России. Анализ выполнялся на основе данных дистанционных методов измерения температуры: лидарного и спутникового.

Использовались данные о вертикальном распределении температуры в стратосфере, полученные с помощью лидарных измерений над регионами г. Томска (56° N, 85° E), г. Якутска (61° N, 130° E) и с. Паратунка Камчатского края (53° N, 158° E) (см. карту на рис. 1). Количество ночей наблюдений в зимние периоды 2008–2010 гг. приведено в таблице. Данные лидарных измерений в ясные ночи были представлены в виде вертикальных профилей температуры, построенных по сигналам с накоплением в течение двух часов и более и с пространственным разрешением 100–300 м. Максимальный интервал высот расчета

Количество ночей лидарных наблюдений.

Лидарная станция	Год		
	2008	2009	2010
Томск	1	6	28
Якутск	8	–	16
Паратунка	10	4	6

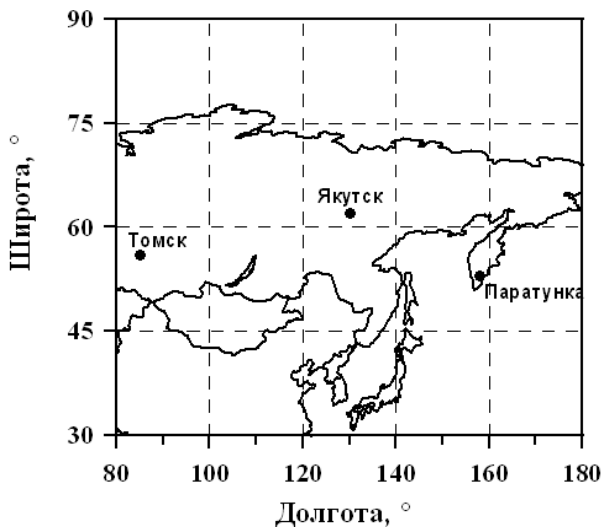


Рис. 1. Карта расположения лидарных станций в азиатской части России.

температуры по лидарным измерениям составлял 10–60 км.

Для комплексного анализа пространственно-временного распределения температуры средней атмосферы совместно с данными лидарных измерений использовались спутниковые данные по температуре, полученные СВЧ-зондом MLS (Microwave Limb Sounder), установленным на борту космического аппарата EOS «Aura». Спутниковые данные MLS/«Aura» по температуре представлены в виде высотных профилей от уровня поверхности Земли до высоты 10^{-5} гПа (0–130 км) [http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/Aura/data-holdings/MLS/ml2t.002.shtml]. Рабочей областью является интервал высот 316–0.001 гПа (примерно 9–92 км), точность измерения температуры составляет от 0.5–1 до 1–2 К, вертикальное разрешение – примерно 3 км. Для исследования развития возмущений температурного режима стратомезосферы во времени по данным глобальных спутниковых измерений температуры MLS/«Aura» строились высотно-временные карты распределения температуры для анализируемых регионов.

В ходе сравнительного анализа данных лидарных и спутниковых измерений температуры атмосферы рассмотрены региональные особенности проявления внезапных стратосферных потеплений над азиатским регионом России в долготном секторе ~85–160° E в период зим 2008–2010 гг.

Результаты анализа данных

Как отмечалось выше, ВСП происходят в зимний период преимущественно в Северном полушарии и проявляются наиболее интенсивно в полярных и субполярных областях стратосферы [Manney et al., 2005; 2009; Labitzke, Kunze, 2009; Narada et al., 2010; Nishii, Nakamura, 2004]. ВСП могут также интенсивно проявляться в средних [Flury et al., 2009; Charyulu et al., 2007; Черниговская, 2008] и даже низких [Eguchi, Kodera, 2007; Kodera, 2006] широтах. Результаты анализа длительного ряда лидарных измерений температуры атмосферы над среднеширотной станцией Томск, выполненных в 1996–2000 гг. [Маричев, 2001], и субполярной станцией Якутск [Маричев и др., 2007; Черемисин и др., 2007] также свидетельствуют об этом.

В исследуемый период 2008–2010 гг. в азиатской части России над территорией Западной, Восточной Сибири и Дальнего Востока каждую зиму по данным лидарных и спутниковых измерений температуры отмечались стратосферные потепления.

В 2008 г. стратосферное потепление происходило со второй половины декабря 2007 г. до 20-х чисел февраля 2008 г. Из высотно-временного распределения температуры для января и февраля 2008 г. в области высот 10–100 км по данным спутниковых измерений MLS/«Aura» для региона Якутска видно, что потепление имело волнообразную структуру с тремя очагами потепления (рис. 2, а), что можно объяснить распространением планетарных волн с периодами порядка 11–22 сут. Наибольшая температура $T=294$ К (21 °C) отмечалась 17.01.2008 г. на высоте ~49 км. В целом отмечалось опускание области

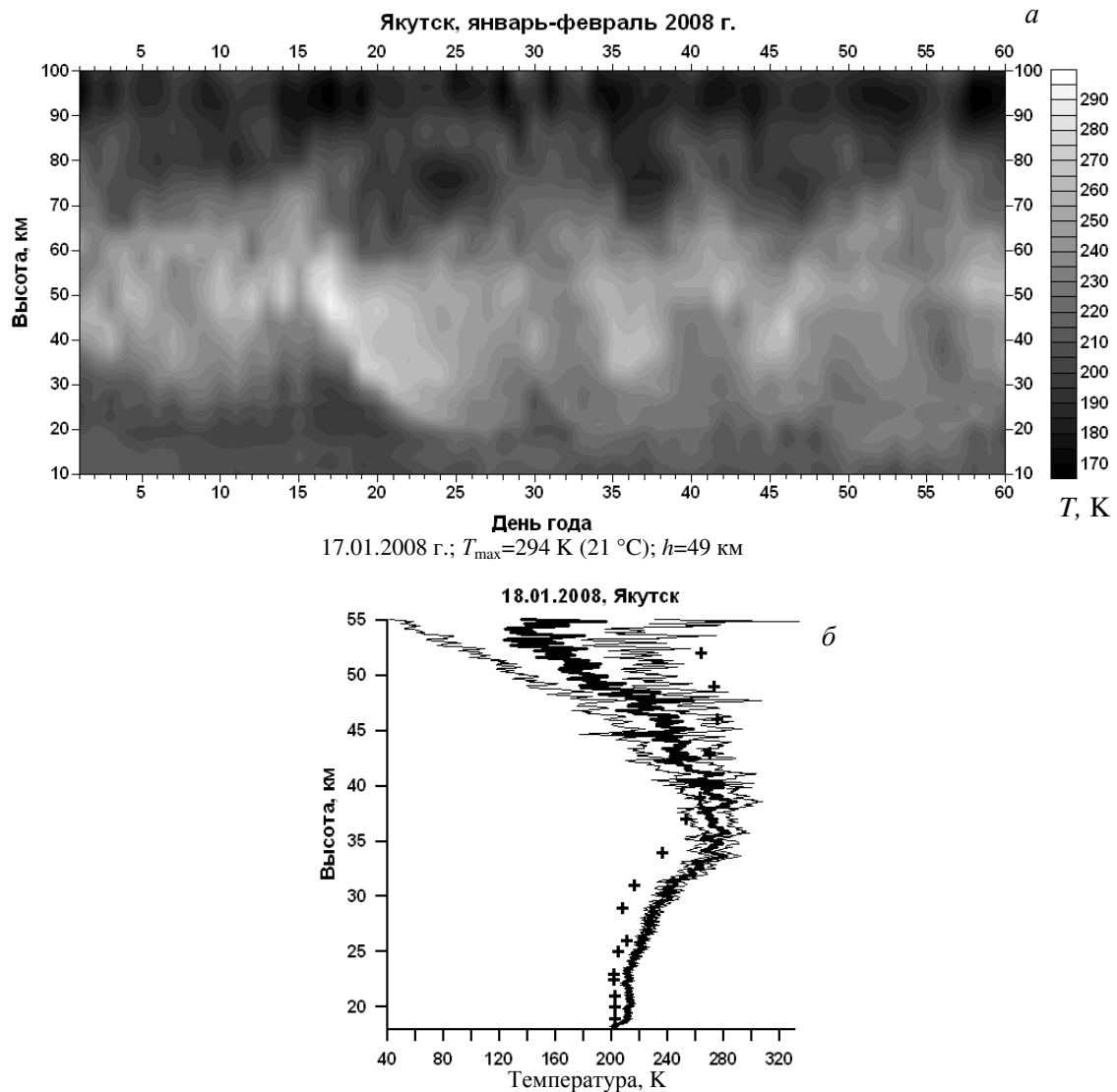


Рис. 2. Карта высотно-временного распределения температуры для января и февраля 2008 г. по данным MLS/«Aura» для региона г. Якутск (а); усредненный за ночь профиль (толстая линия; тонкие линии дают коридор стандартного отклонения) высотного распределения температуры для 18.01.2008 г., измеренный лидарной станцией Якутск, и температура по спутниковым измерениям MLS/«Aura» для региона Якутска (крестики) (б).

повышенных температур стратосферы до высот порядка 25 км. В период развития потепления зимой 2008 г. выполнялись лидарные измерения температуры в Якутске. Усредненный за ночь профиль высотного распределения температуры для 18 января 2008 г. приведен на рис. 2, б, здесь же для сравнения приведены температуры спутниковых измерений MLS/«Aura».

Потепление 2009 г. развивалось в период с 10 по 30 января (см. карту высотно-временного распределения температуры для региона г. Томск на рис. 3, а). Это было потепление типа «major» [Manney et al., 2005; 2009; Labitzke, Kunze, 2009]. Температура по сравнению с невозмущенными днями (8–10 и 29–31 января 2009 г.) повысилась на ~70–80° и достигла 21 января 2009 г. 312 K (39 °C) на высоте 46 км. Область повышенных значений температуры в стратопause расширилась до двух десятков километров и опустилась до высот порядка 30 км. Данные лидарных измерений за 21, 22 и 31 января 2009 г., представленные на рис. 3, б, в целом подтверждают приведен-

ные выше особенности вариаций температуры. Здесь же на рисунке приведены для сравнения профили температуры по спутниковым измерениям MLS/«Aura», высотные распределения температуры, рассчитанные по модели CIRA-86, а также (в нижней части) нанесены профили температур по данным измерений с помощью аэрологических зондов на ст. Колпашево (240 км от Томска). Максимальные значения температуры в стратосфере по лидарным данным, так же как и по спутниковым, были отмечены 21 января 2009 г., но они превышали значения температуры по измерениям MLS/«Aura». К 31 января 2009 г. температура стратосферы уменьшилась до 220–230 K (–53÷–43 °C) и возвратилась к невозмущенной зимней норме.

Во время зимнего потепления с 15 по 30 января 2010 г. лидарные измерения проводились в Томске и Якутске. Средние за ночь высотные профили лидарных измерений температуры (рис. 4, б и 5, б) приведены вместе с картами высотно-временных распределений температуры для регионов Томска (рис. 4, а) и

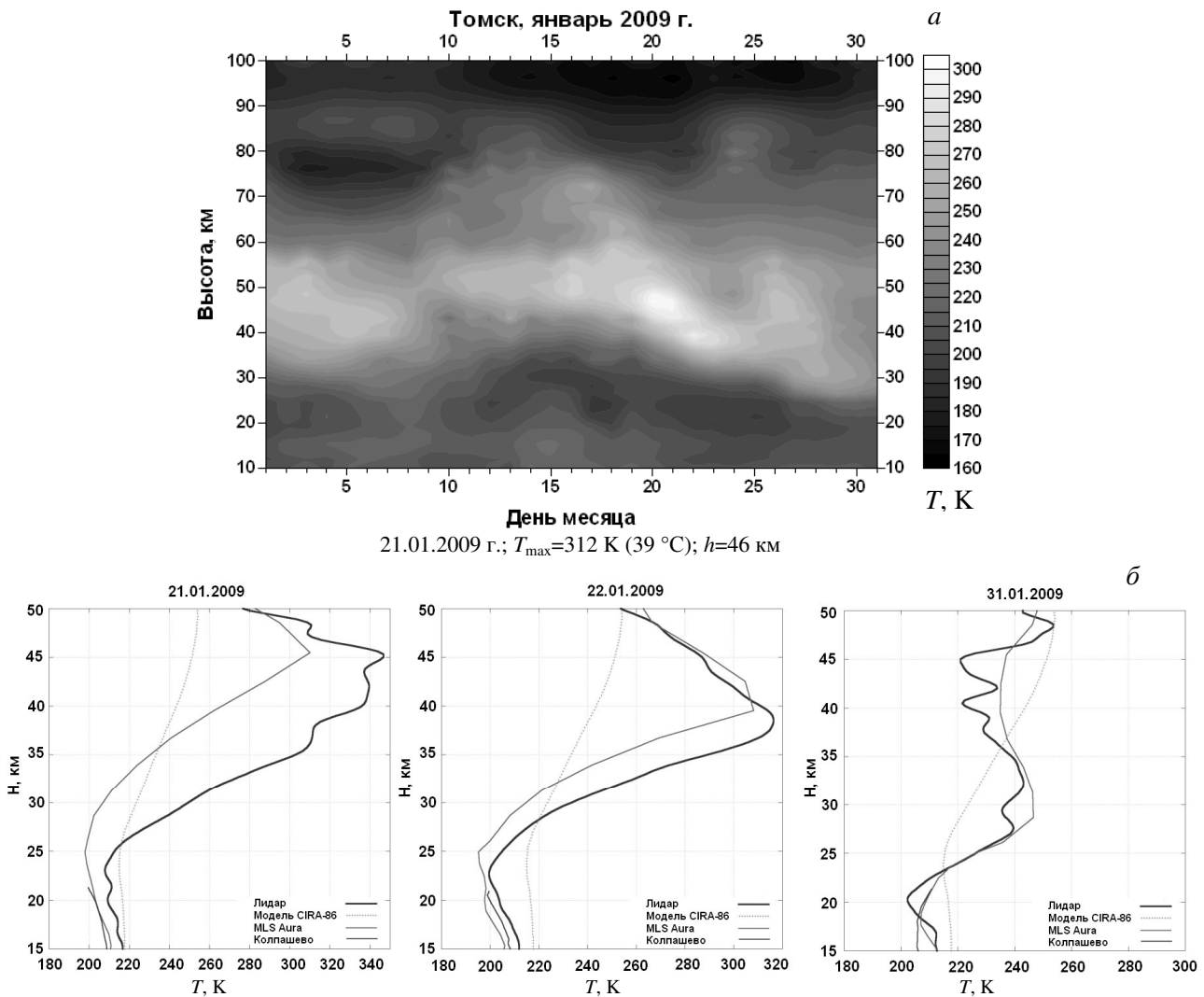


Рис. 3. Карта высотно-временного распределения температуры для января 2009 г. по данным MLS/«Aura» для региона Томска (а); усредненные за ночь высотные профили лидарных измерений температуры на ст. Томск, высотные профили температуры по спутниковым измерениям MLS/«Aura» для региона Томска, модельным расчетам по CIRA-86 и зондовым измерениям на ст. Колпашево для 21, 22 и 31.01.2009 г. (б).

Якутска (рис. 5, а) по спутниковым измерениям MLS/«Aura».

Первое температурное возмущение было зарегистрировано 15–17 января 2010 г. Это был очаг теплого воздуха в области высот 34–44 км. К 21 января наступило некоторое понижение температуры. Следующие волны потепления наблюдались 22–24 и 26–29 января 2010 г. Максимальная температура в регионе Томска отмечалась 27 января 2010 г. на высоте 37 км ($T=307$ К (34 °С)), а в регионе Якутска – 23 января 2010 г. на высоте 43 км ($T=286$ К (13 °С)). Стратопауза опустилась до высоты 38 км. Перепад температур на уровне стратопаузы (максимум в вертикальном распределении) составил более 60° . Двадцать девятого января рост температуры прекратился, а стратопауза продолжала опускаться до уровня 30 км.

Заключение и выводы

В результате комплексного анализа возмущений температурного режима средней атмосферы Земли, связанных с событиями внезапных страто-

сферных потеплений, наблюдавшихся в 2008–2010 гг., установлено:

1. Каждую зиму в анализируемый период над исследуемыми регионами азиатской части России по данным лидарных и спутниковых измерений температуры отмечались стратосферные потепления. Наиболее значительные повышения температуры на уровне стратосферы отмечались над регионом г. Томска. Над Якутском ВСП были менее интенсивными, а над регионом Камчатки повышение стратосферной температуры было еще менее выраженным. Это связано, по-видимому, с особенностями траекторий перемещения очагов повышенной температуры в стратосфере в рассматриваемые годы. Карты глобального распределения температуры по данным спутниковых измерений MLS/«Aura» показали, что очаги стратосферных потеплений, пройдя регионы Западной и Восточной Сибири, перемещались по направлению к северо-западу, захватывая Якутию и достигая наибольшей интенсивности над регионом г. Норильска.

2. Данные лидарных и спутниковых измерений температуры подтвердили ранее известные особен-

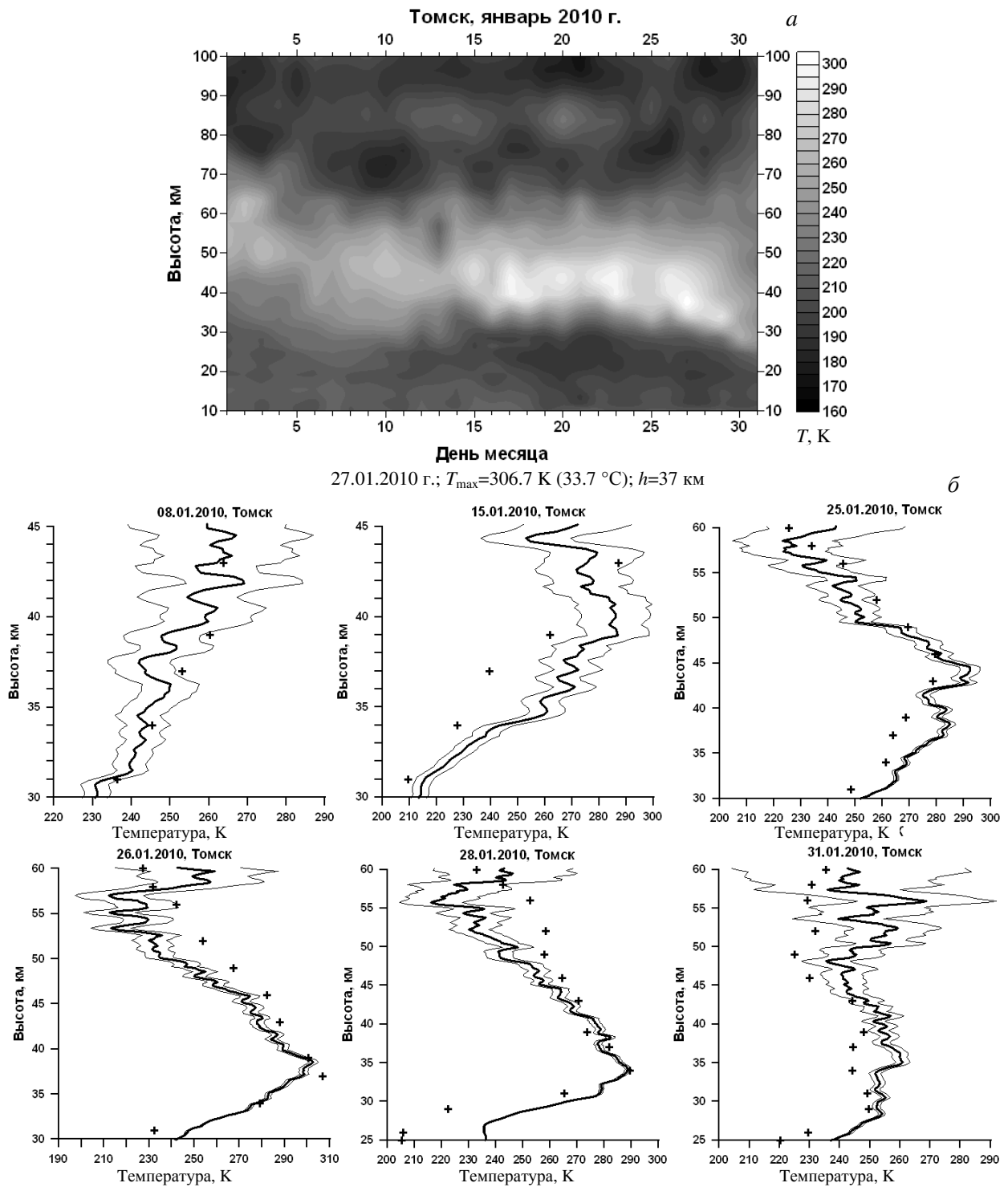


Рис. 4. Карта высотно-временного распределения температуры для января 2010 г. по данным MLS/«Aura» для региона Томска (а); усредненные за ночь профили (толстая линия; тонкие линии дают коридор стандартного отклонения) высотного распределения температуры, измеренные лидарной станцией Томск, и температуры спутниковых измерений MLS/«Aura» для региона Томска (крестики) (б).

ности зимних стратосферных потеплений. Во время развития ВСП на высотных профилях температуры появлялись несколько максимумов, четко выраженные стратопауза и мезопауза отсутствовали. Области повышенных значений температуры в стратопаузе расширялись до десятка километров и более и опускались до высот порядка 25 км.

3. В целом отмечено удовлетворительное согласие данных измерений высотного распределения температуры стратосферы лидарным и спут-

никовым методами. Расхождения могли, на наш взгляд, быть связаны с особенностями применяемых методик измерения, а также с тем, что данные лидарных измерений представляли собой средние за ночь профили высотного распределения температуры, а спутниковые измерения относились к определенным моментам времени пролетов спутников. Кроме того, данные спутниковых измерений относились не к конкретно заданной географической координате, а к координатам, находящимся внутри

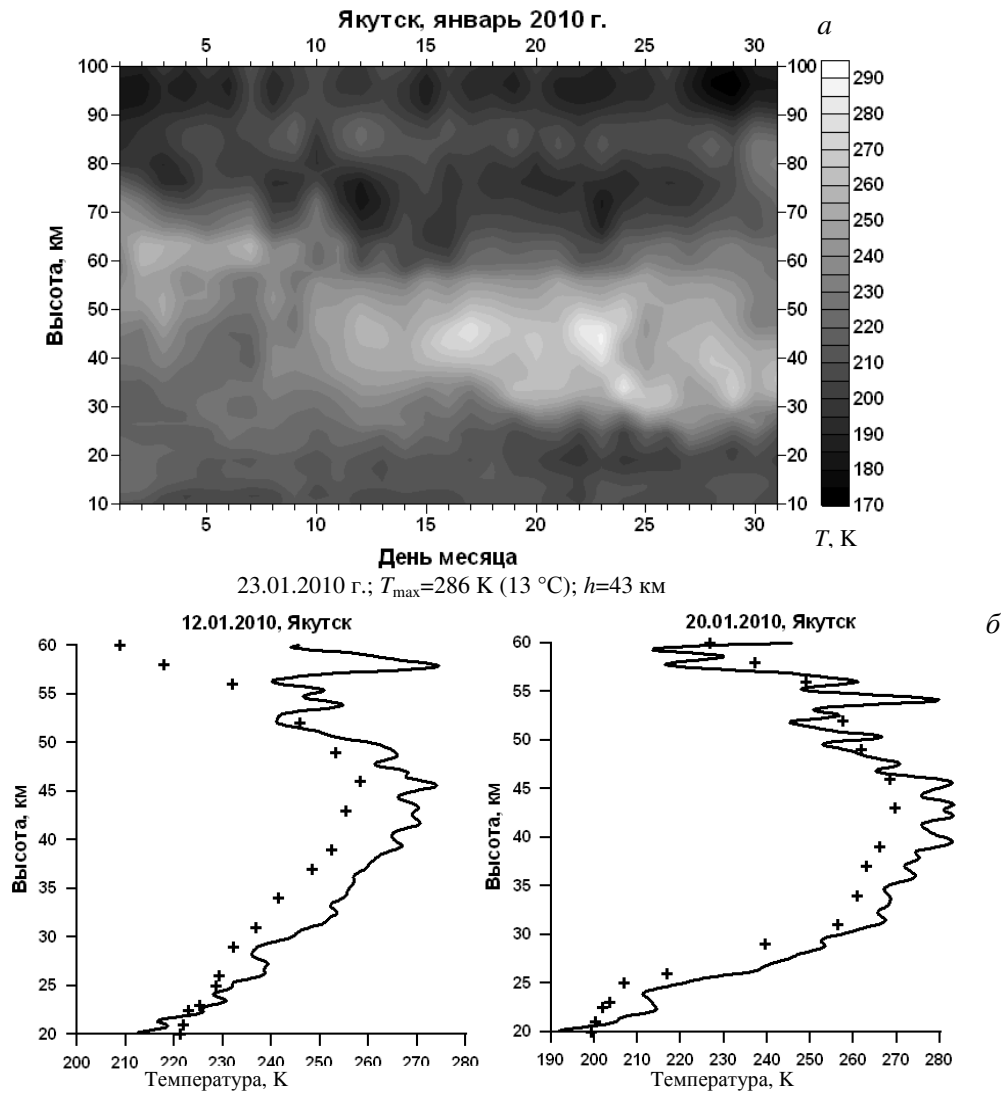


Рис. 5. Карта высотно-временного распределения температуры для января 2010 г. по данным MLS/«Aura» для региона Якутска (а); усредненные за ночь профили (толстая линия; тонкие линии дают коридор стандартного отклонения) высотного распределения температуры для 12 и 20 января 2010 г., измеренные лидарной станцией Якутск, и температура по спутниковым измерениям MLS/«Aura» для региона Якутска (крестики) (б).

заданного радиуса поиска траектории спутника (например, 500 км).

Работа выполнена при финансовой поддержке Интеграционного проекта СО РАН № 15 и гранта РФФИ 10-05-00907_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Варгин П.Н., Юшков В.А., Хайкин С.М., и др. Изменение климата и средняя атмосфера – вопросов все больше // Вестник РАН. 2010. № 2. С. 114–124.
 Кокина Г.А., Гайгеров С.С. Метеорология верхней атмосферы Земли. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 270 с.
 Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М. Метеорологическое зондирование атмосферы из космоса. Л.: Гидрометеоздат, 1978. 279 с.
 Маричев В.Н. Лидарные наблюдения зимних стратосферных потеплений над Томском в 1996–2000 гг. // Метеорология и гидрология. 2001. № 8. С. 41–48.
 Маричев В.Н., Николашкин С.В., Титов С.В. Лидарные наблюдения зимних стратосферных потеплений над Якутском в 2005–2007 гг. // Сборник докладов IV Международной конференции «Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений». 2007. С. 159.

Монин А.С. Введение в теорию климата. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 247 с.
 Погосян Х.П. Общая циркуляция атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1972. 394 с.
 Хромов С.П., Мамонтова Л.И. Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеоздат, 1974. 568 с.
 Хргиан А.Х. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1969. 647 с.
 Черемисин А.А., Кушнарченко А.В., Маричев В.Н. и др. Метеорологические условия и полярные стратосферные облака над Якутском зимой 2004/05 г. // Метеорология и гидрология. 2007. № 3. С. 43–53.
 Черниговская М.А. Морфологические особенности температурного режима атмосферы в регионе юга Восточной Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2008. Т. 21, № 12. С. 1101–1107.
 Charlton A.J., Polvani L.M., et al. A new look at stratospheric sudden warmings. Part 1, 2 // J. Climate. 2007. V. 20. P. 449–488.
 Charyulu D.V., Sivakuma V., Bencherif H., et al. 20-year LIDAR observations of stratospheric sudden warming over a mid-latitude site, Observatoire de Haute Provence: case study and statistical characteristics // Atmos. Chem. Phys. Discuss. 2007. V. 7. P. 15739–15779.

- Deng S., Chen Y., Luo T. The possible influence of stratospheric sudden warming on East Asian weather // *Adv. Atmos. Sci.* 2008. V. 25, N 5. P. 841–846.
- Eguchi N., Kodera K. Impact of the 2002, Southern Hemisphere, stratospheric warming on the tropical cirrus clouds and convective activity // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34. L05819. doi:10.1029/2006GL028744.
- Flury T., Hocke K., Haefele A., et al. Ozone depletion, water vapor increase, and PSC generation at midlatitudes by the 2008 major stratospheric warming // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. D18302. doi:10.1029/2009JD011940.
- Harada Y., Goto A., Hasegawa H., et al. A major stratospheric sudden warming event in January 2009 // *J. Atmos. Sci.* 2010. V. 67. P. 2052–2069. doi: 10.1175/2009JAS3320.1.
- Kodera K. Influence of stratospheric sudden warming on the equatorial troposphere // *Geophys. Res. Lett.* 2006. V. 33. L06804. doi:10.1029/2005GL024510.
- Kodera K., Mukougawa H., Itoh S. Tropospheric impact of reflected planetary waves from the stratosphere // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. L16806. doi:10.1029/2008GL034575.
- Labitzke K. Stratospheric-mesospheric midwinter disturbances: a summary of observed characteristics // *J. Geophys. Res.* 1981. V. 86, N C10. P. 9665–9678.
- Labitzke K., Loon H. van. *The Stratosphere: Phenomena, History, and Relevance.* Berlin: Springer, 1999. 179 p.
- Labitzke K., Kunze M. On the remarkable Arctic winter 2008/2009 // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. D00I02. doi: 10.1029/2009JD012273.
- Manney G.L., Kruger K., Sabutis J.L., et al. The remarkable 2003–2004 winter and other recent warm winters in the Arctic stratosphere since the late 1990s // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. D04107. doi:10.1029/2004JD005367.
- Manney G.L., Schwartz M.J., Kruger K., et al. Aura Microwave Limb Sounder observations of dynamics and transport during the record-breaking 2009 Arctic stratospheric major warming // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. L12815. doi:10.1029/2009GL038586.
- Matsuno T. A dynamical model of stratospheric sudden warming // *J. Atmos. Sci.* 1971. V. 28. P. 1479–1494.
- Mohanakumar K. *Stratosphere-Troposphere Interactions. An Introduction.* New York: Springer-Verlag, 2008. 436 p.
- Nishii K., Nakamura H. Tropospheric influence on Antarctic ozone hole split 2002 // *Geophys. Res. Letters.* 2004. V. 31. L16103. doi:10.1029/2004GL019532.
- Peters D., Vargin P., Körnich H. A study of the zonally asymmetric tropospheric forcing of the austral vortex splitting during September 2002 // *Tellus A.* 2007. V. 59, N 3. P. 384–394.
- Peters D., Vargin P., Gabriel A., et al. Tropospheric forcing of the boreal polar vortex splitting in January 2003 // *Ann. Geophys.* 2010. V. 28. P. 2133–2148.

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск

²Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск

³Институт космофизических исследований и аэронауки СО РАН, Якутск

⁴Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Паратунка