

## О роли вулканогенного разогрева тропической стратосферы в формировании очагов тепла в арктических регионах

В.В. Зуев, Н.Е. Зуева, Е.С. Савельева,  
А.П. Шелехов, Е.А. Шелехова\*

*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН  
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3*

Поступила в редакцию 26.08.2013 г.

После мощных извержений тропических вулканов в стратосфере наблюдается систематическое повышение температур относительно многолетних норм. Температурные аномалии в стратосфере тропического пояса вызывают формирование очагов тепла в Арктическом регионе, что в свою очередь приводит к значительному уменьшению границ ледового покрова Северного Ледовитого океана. С использованием спектральной модели общей циркуляции атмосферы промежуточной сложности проанализировано возмущающее влияние новых температурных контрастов в стратосфере Северного полушария на климатические изменения в арктических регионах. Рассмотрено влияние мощных вулканических извержений на временные ряды изменений температуры тропической стратосферы и приземных температур для региона п-ова Чукотка. Установлено, что все мощные вулканогенные аэрозольные возмущения стратосферы откликаются в течение 10 лет всплесками температур у поверхности Земли в очаге тепла на п-ове Чукотка.

*Ключевые слова:* вулканические извержения, углеродные частицы, стратосфера, очаги тепла, п-ов Чукотка, ледовый покров Северного Ледовитого океана; volcanic eruptions, black carbon, stratosphere, heat centers, Chukotka Peninsula, Arctic Ocean ice cover.

### Введение

Глобальное потепление, значительно ускорившееся в конце XX в., крайне неоднородно. Наиболее чувствительными к климатическим изменениям оказались арктические регионы, где потепление вызвало существенные потери ледового покрова. Данные спутникового мониторинга минимальных границ ледового покрова Северного Ледовитого океана при положительных температурах в сентябре показывают их значительное уменьшение за последние 30 лет (рис. 1).

Основные потери льда фиксируются со стороны п-овов Чукотка и Аляска, особенно в Восточно-Сибирском море, что указывает на формирование в этих регионах очагов тепла. В это же время со стороны о-вов Гренландия и Канадского Арктического архипелага и п-ова Таймыр изменения ледовых границ минимальны. В этих регионах сохранились очаги относительного холода.

Очаговый характер климатических изменений в высоких широтах, как правило, есть следствие возмущений общей циркуляции атмосферы (ОЦА), происходящих в тропическом поясе широт.

### Вулканогенный разогрев тропической стратосферы

Результаты многолетних шар-зондовых измерений вертикальных профилей температуры на тропических метеостанциях показывают, что после мощных извержений тропических вулканов в стратосфере на уровнях 30 и 50 мбар (примерно на высотах 23 и 20 км соответственно) наблюдается систематическое повышение температур относительно многолетних норм, которое сохраняется около двух лет. Из оценок, проведенных в работе [1] с учетом квазидвухлетних циклов изменения динамики тропической стратосферы, видно, что максимальные потепления в экваториальной зоне достигали 3 °С на уровне 50 мбар после извержений вулканов Агунг (1963 г.) и Пинатубо (1991 г.).

Считается, что эффект потепления тропической стратосферы связан с поглощением восходящей длинноволновой радиации Земли вулканогенным сернокислотным аэрозолем, состоящим из 75%-го водного раствора серной кислоты. Его источником являются газопепловые эруптивные колонны, формирующиеся при мощных извержениях плинианского типа, верхняя часть которых достигает стратосферных высот. Этот аэрозоль обладает высокой плавучестью, время его жизни в стратосфере достигает нескольких лет.

\* Владимир Владимирович Зуев (vzuev@imces.ru);  
Нина Евгеньевна Зуева (ref\_zuev@iao.ru); Екатерина Сергеевна Савельева; Александр Петрович Шелехов; Евгения Александровна Шелехова.

16 сентября 2012 (летний минимум)



Рис. 1. Результаты космического мониторинга минимальных границ ледовых полей в Северном Ледовитом океане с 1979 по 2007 г. [2]

Оптические свойства сернокислотного аэрозоля изучены хорошо. Он практически не поглощает коротковолновую радиацию в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра. Но в длинноволновой (тепловой) части ИК-спектра у него действительно имеются слабоинтенсивные полосы поглощения. Однако при анализе температурного режима тропической стратосферы после мощных извержений вулканов нами была обнаружена еще одна особенность температурных аномалий. По данным гавайской станции Lihue, представленным на сайте [3], в июле 1992 г. дневные температуры на уровне 30 мбар систематически на 2–3 °С превышали ночные с максимальными отклонениями до 7 °С (рис. 2).

В фоновый период 1999 г. разности дневных и ночных температур разбросаны случайным образом (рис. 2). Поскольку суточные амплитуды температур

поверхности океана вдали от материков (условия Гавайских островов) не превышают 0,5 °С, суточная модуляция восходящих потоков тепловой радиации незначительна. Следовательно, систематическое превышение в стратосфере над Гавайями на уровне 30 мбар дневных температур над ночными указывает на то, что вулканогенный аэрозоль активно поглощает коротковолновую солнечную радиацию. Это возможно только в том случае, если он имеет более сложные, чем принято считать, химический состав и структуру, определяющие изменения его оптических свойств. Если предположить, что кроме сернокислотного аэрозоля в состав вулканогенного аэрозоля входят углеродные частицы размерами менее 0,1 мкм, то такой смешанный аэрозоль способен эффективно поглощать не только длинноволновую, но и коротковолновую радиацию.

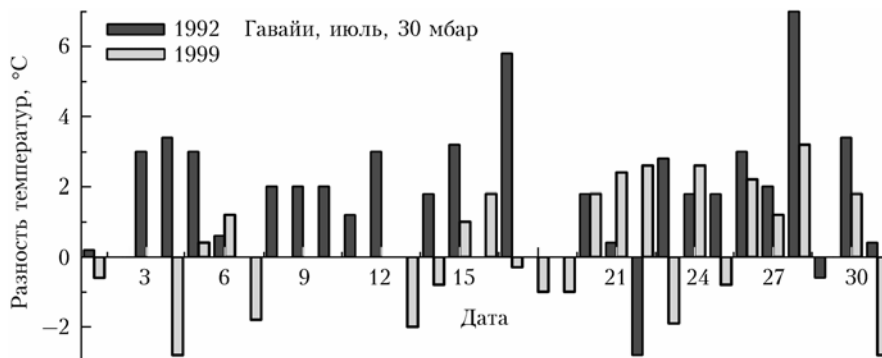


Рис. 2. Разности дневных и ночных температур в июле на уровне 30 мбар по данным гавайской станции Lihue в условиях возмущенной (1992 г., темные столбики) и фоновой (1999 г., светлые столбики) стратосферы

До недавнего времени образование черных углеродных частиц вследствие вулканического извержения традиционно не рассматривалось. Известно, что элементарный углерод в составе аэрозольных частиц имеет, в основном, сажевое происхождение в результате неполного сгорания органического материала. Однако проведенный анализ данных литературных источников [4–6] показал: мнение о том, что вулканизм является источником преимущественно сернокислого аэрозоля, а не сажи, во многом базируется на неких устоявшихся традиционных представлениях, а не на твердой доказательной базе. С другой стороны, именно наличие «черного» углерода в составе стратосферных аэрозолей во многом позволяет объяснить наблюдаемые температурные аномалии.

В вулканических выбросах часто присутствует метан с содержанием до 0,3%. Кроме того, температурный режим вулканической газопепловой эруптивной колонны (примерно от 1200 °C в центральной части до температур окружающей среды на периферии) обеспечивает дополнительное образование метана при температурах 300–350 °C за счет синтеза монооксида углерода CO с водородом H<sub>2</sub> в присутствии катализатора (металл VIII группы, например Fe), которые всегда в значительных количествах находятся в вулканических выбросах. Метан, всасывающийся в центральную часть эруптивной колонны, где статическое давление минимально, термически разлагается с образованием сажи при температурах более 1000 °C и малом содержании кислорода. В верхней части эруптивной колонны в стратосфере формируется эруптивная туча, в которой в условиях резкого адиабатического охлаждения и интенсивной турбулентности образуются наноразмерные углеродные частицы точно так же, как это происходит в технологических реакторах по производству наноразмерного технического углерода.

В «сухой» стратосфере углеродные наночастицы способны существовать несколько лет, обеспечивая разогрев стратосферного воздуха. Кроме того, на их поверхности может происходить интенсивное разрушение стратосферного озона, что хорошо объясняет его долговременную вулканогенную депрессию. Выброшенные в тропическую стратосферу вулканогенные углеродные наночастицы «размазываются» стратосферными зональными ветрами во всем тропическом поясе. На рис. 3, *a* приведены годовые ряды стратосферных температур на уровне 50 мбар для 16 разнесенных тропических станций, построенные по суточным данным, представленным на сайте [3], и сглаженным по 30 точкам. Список станций и их координаты приведены в табл. 1.

Из рис. 3, *a* видно, что изменение стратосферных температур над тропическими метеостанциями происходит довольно синхронно, что и отражается в усредненном ряде температур. На рис. 3, *б* этот усредненный ряд представлен на фоне временного ряда индексов вулканической взрывчатости для извержений тропических вулканов с VEI ≥ 4, вызвавших аэрозольное возмущение стратосферы (VEI, Volcanic Explosivity Index, характеризует объем выброшенного продукта по 8-бальной шкале). Характеристики

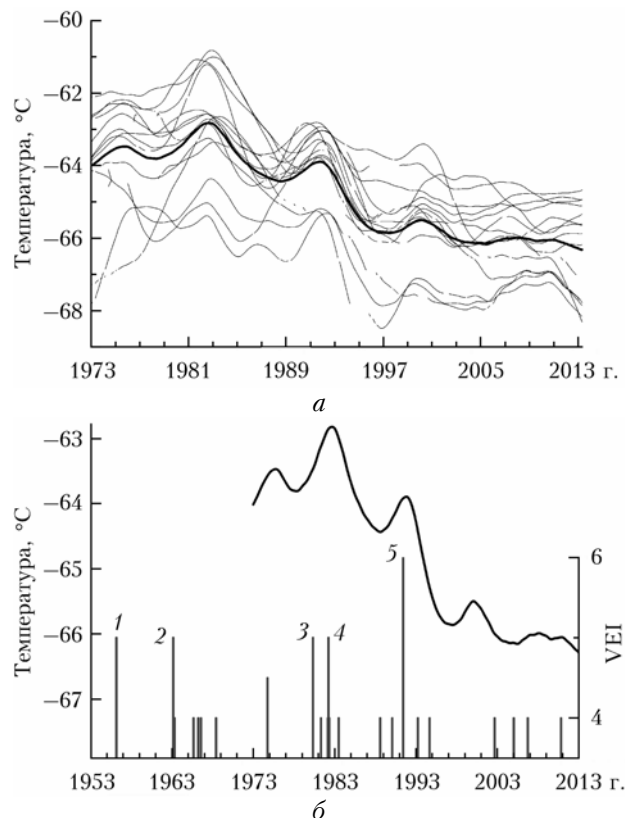


Рис. 3. Временные ряды стратосферных температур на уровне 50 мбар над тропическими метеостанциями по списку из табл. 1 (*a*); усредненный ряд стратосферных температур и ряд индексов извержений тропических вулканов с VEI ≥ 4, включая индексы извержений вулканов Безьянный и Сент-Хеленс (*б*)

Таблица 1  
Координаты тропических станций пояса  
20° с.ш. – 20° ю.ш.

Регион	Станция		Координаты (широта/долгота), град
	номер	название	
Северная Америка	76692	Hacienda	19,15/–96,11
	78526	TJSJ San Juan	18,43/–66,00
Южная Америка	82332	SBMN Manaus	–3,15/–59,98
	82599	SBNT Natal	–5,91/–35,25
	83378	SBBR Brasilia	–15,86/–47,93
Африка	61641	GOOY Dakar	14,73/–17,50
	61052	DRRN Niamey-Aero	13,48/2,16
	63741	NKNC Nairobi	–1,30/36,75
Австралия	94294	YBTL Townsville	–19,25/146,76
	94312	YPPD Port Hedland	–20,36/118,63
Таиланд	48407	VTUU Ubon	15,25/104,86
Малайзия	48657	WMKD Kuantan	3,77/103,20
Тихий океан	91285	PHTO Hilo	19,71/–155,06
	91610	NGTA Tarawa	1,35/172,91
	91680	NFFN Nadi	–17,75/177,45
Мадагаскар	67083	FMMI Antananarivo	–18,80/47,48

этих извержений приведены в табл. 2. Цифрами на рис. 3, *б* указаны мощнейшие извержения второй половины XX в. с VEI ≥ 5: 1 – Безьянный (1956 г.),

Таблица 2

## Характеристики мощных извержений тропических вулканов в период 1953–2013 гг.

Годы	№ извержения	Год (месяц)	Вулкан	Местность	VEI	Высота, км
1953–1973	1	1953 (03)	Безымянный*	Камчатка	5	> 30
	2	1963 (03)	Агунг	Индонезия	5	25
	3	1965 (09)	Таал	Папуа – Новая Гвинея	4	–
	4	1966 (04)	Келут	Индонезия	4	–
	5	1966 (08)	Аву	Индонезия	4	–
	6	1968 (06)	Фернандина	Эквадор	4	–
1974–1994	1	1974 (10)	Фуэго	Гватемала	4	20
	2	1979 (04)	Суфриер	Вест-Индия	3	18
	3	1980 (05)	Сент-Хеленс*	США	5	25
	4	1981 (05)	Паган	Марианские о-ва	4	20
	5	1982 (04)	Эль-Чичон	Мексика	5	30
	6	1982 (05)	Галанггунг	Индонезия	4	16
	7	1983 (07)	Коло	Индонезия	4	16
	8	1985 (11)	Невадо-Дель-Руис	Колумбия	3	28
	9	1988 (08)	Банда Апи	Индонезия	4	17
	10	1990 (02)	Келут	Индонезия	4	20
	11	1991 (06)	Пинатубо	Филиппины	6	40
	12	1993 (04)	Ласкар	Северное Чили	4	25
	13	1994 (09)	Рабаул	Папуа – Новая Гвинея	4	18
1995–2013	1	2002 (09)	Руанг	Индонезия	4	18
	2	2005 (01)	Манам	Папуа – Новая Гвинея	4	20
	3	2006 (10)	Рабаул	Папуа – Новая Гвинея	4	18
	4	2010 (11)	Мерапи	Индонезия	4	22

\* Мощные извержения внетропических вулканов.

2 – Агунг (1963 г.), 3 – Сент-Хеленс (1980 г.), 4 – Эль-Чичон (1982 г.), 5 – Пинатубо (1991 г.). Отметим, что в этом ряду представлены извержения не только тропических, но и двух внетропических вулканов – Безымянного и Сент-Хеленс. На рис. 3, б видно, что в период активности мощных вулканов с  $VEI \geq 5$  стратосферные температуры в тропиках на уровне 50 мбар были на 2–3 °C выше, чем в последние 20 лет, когда произошло всего несколько незначительных извержений с  $VEI \sim 4$ .

### Анализ вулканогенных возмущений общей циркуляции атмосферы

Температурные аномалии в стратосфере тропического пояса формируют новые температурные контрасты с областями полярных широт, вызывающие возмущения ОЦА. Контрасты дополнительно усиливаются в периоды вулканогенной депрессии стратосферного озона. Она проявляется главным образом в полярных регионах. При этом уменьшение содержания озона в стратосфере приводит к ее похолоданию.

Для того чтобы проанализировать возмущающее влияние новых температурных контрастов в стратосфере Северного полушария на климатические изменения в арктических регионах, можно воспользоваться

численными моделями ОЦА. Мы использовали спектральную модель ОЦА промежуточной сложности, описанную в [7]. Спектральное разрешение модели по горизонтали T42 ( $2,81 \times 2,81^\circ$  по широте и долготе), по вертикали 32 уровня.

В численном эксперименте мы смоделировали дополнительный нагрев стратосферы на 2 °C на высоте 21 км в поясе широт 20–23° с.ш., в контроле – без нагрева. Длительность каждого эксперимента 18 лет, причем в эксперименте дополнительный нагрев проводился первые 8 лет для разгона модели, затем нагрев выключался. Анализ результатов проводился по схеме «эксперимент на чувствительность», т.е. по разности данных эксперимента и контроля в течение 10 лет после выключения нагрева.

На рис. 4 приведен один из результатов проведенного численного эксперимента: поле средних за 10 лет разностей температур у поверхности Земли для середины сентября в регионах Северного Ледовитого океана. Темные цвета характеризуют очаги потепления, а светлые – похолодания.

Сравнения результатов моделирования (рис. 4) и наблюдений (см. рис. 1) показало их полное соответствие. Из рис. 4 видно, что языки очагов тепла обеспечивают прогрев моря Бофорта, Восточно-Сибирского и Баренцева морей. Баренцево море в сентябре всегда чисто ото льда, чему в большей степени

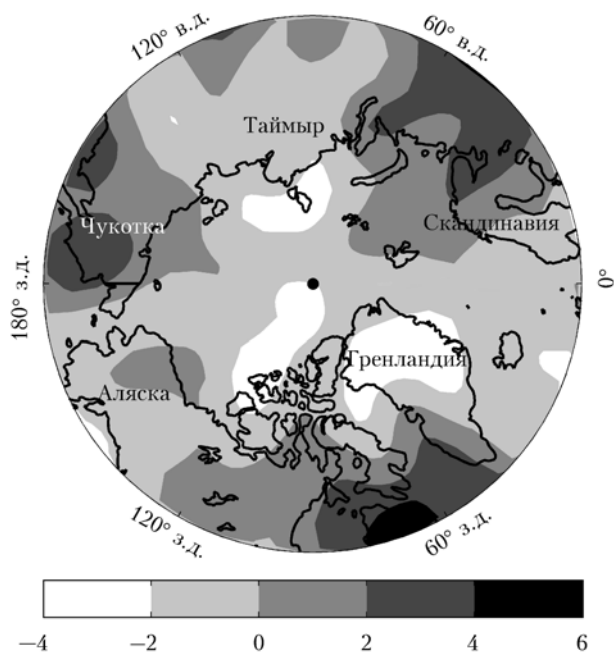


Рис. 4. Результат численного эксперимента: поле разностей температур у поверхности Земли для сентября в регионах Северного Ледовитого океана, усредненных за 10 лет после выключения нагрева в тропической стратосфере

способствует океанический прогрев Северо-атлантическим течением. Однако потери ледового покрова в Восточно-Сибирском, Чукотском морях и море Бофорта на рис. 1, скорее всего, связаны с появлением очагов тепла на п-овах Чукотка и Аляска, возникающих как результат вулканогенного разогрева тропической стратосферы. Более того, на рис. 1 и 4 наблюдается также полное соответствие в расположении очагов похолодания в районах о-вов Гренландия и Канадского Арктического архипелага и п-ова Таймыр.

Для дополнительной проверки связи динамики очага тепла на п-ове Чукотка с активностью вулканов мы проанализировали поведение приземных температур по данным метеостанций в этом регионе, список которых приведен в табл. 3.

Таблица 3

Координаты станций Чукотского региона		
Станция		Координаты (широта/долгота), град
номер	название	
25034	Амбарчик бухта	69,62/162,30
25042	Остров Айон	69,93/167,98
25138	Островное	68,12/164,17
25206	Среднеколымск	67,45/153,72
25248	Илирней	67,25/167,97
25325	Усть-Олой	66,55/159,42
25356	Эньмувеем	66,38/173,33
25378	Эгвекинот	66,35/180,88
25399	Уэлен	66,17/190,17
25428	Омолон	65,23/160,53
25551	Марково	64,68/170,42
25563	Анадырь	64,78/177,57
25954	Корф	60,35/166,00
25956	Алука	60,43/169,67

### О роли вулканогенного разогрева тропической стратосферы в формировании очагов тепла...

На рис. 5 приведен ряд изменений среднемесячных приземных температур (сплошная кривая), усредненных для этих станций и сглаженных по 30 точкам по данным сайта [8]. Столбиками в нижней части рис. 5 приведен тот же самый временной ряд индексов вулканической взрывчатости для извержений с VEI ~ 4, что и на рис. 3, б, но только сдвинутый вперед на 5 лет, т.е. на середину рассматриваемого в модельном эксперименте 10-летнего периода.

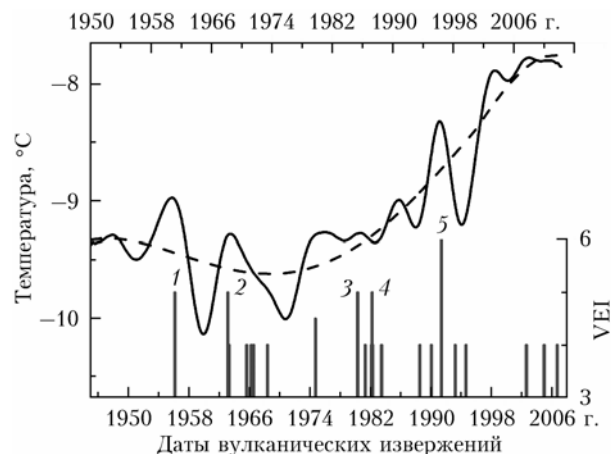


Рис. 5. Временной ряд изменений приземных температур для региона п-ова Чукотка и временной ряд индексов VEI, сдвинутый вперед на 5 лет относительно температурного ряда

На рис. 5 видно, что все мощные вулканогенные аэрозольные возмущения стратосферы откликаются через 5 лет всплесками температур у поверхности Земли в очаге тепла на п-ове Чукотка. В период высокой частоты следования мощных вулканических взрывных извержений с середины 70-х до середины 90-х гг. XX в. эти всплески накладываются друг на друга, что могло способствовать ускорению роста приземных температур.

## Заключение

Изменения климата в арктических регионах, по существу, определяют климатические изменения в Северном полушарии в целом. На рис. 5 штриховой линией показана тенденция изменения приземных температур на п-ове Чукотка с 1950 по 2012 г. Их начало соответствует концу периода похолодания 50–60-х гг. XX в. Затем ускоренный рост температур вплоть до конца XX в., и в конце намечающаяся тенденция стабилизации температур.

Хорошее совпадение результатов численного моделирования с данными наблюдений позволяет с высокой степенью вероятности полагать, что ускоренный рост температур в очаге тепла на п-ове Чукотка вызван кумулятивным сложением температурных всплесков после частых вулканогенных аэрозольных возмущений стратосферы преимущественно в тропическом поясе широт. Как видно из табл. 2, в период 1974–1994 гг. происходило в среднем одно мощное извержение вулкана каждые полтора года.

Таким образом, ускоренное потепление климата в последней четверти XX в. в этом регионе, по всей

видимости, обусловлено аномально высокой частотой взрывных извержений тропических вулканов в этот период. Наоборот, значительное снижение их активности в последние 20 лет, скорее всего, способствовало наступлению стабилизации температур в этом регионе.

Работа выполнена по проекту фундаментальных исследований СО РАН VIII.77.1.2 при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (Соглашение № 14.В37.21.0667).

1. *Angell J.K.* Stratospheric warming due to Agung, El Chichon, and Pinatubo taking into account the quasi-biennial oscillation // *J. Geophys. Res. D.* 1997. V. 102, N 8. P. 18.775–18.785.
2. *URL:* <http://ns:dc.org>

3. *URL:* <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>
4. *Mather T.A., Pyle D.M., Oppenheimer C.* Volcanism and the Earth's Atmosphere. Tropospheric Volcanic Aerosol / Ed. by A. Robock, C. Oppenheimer // *Geophys. Monogr. series.* 2003. V. 139. P. 189–212.
5. *Hartmann D.L., Mouginis-Mark P.J.* Volcanoes and climate effects of aerosols // *EOS science plan: executive summary* / Ed. R. Greenstone, M.D. King. Washington, D.C.: NASA, 1999. P. 339–378.
6. *Martin R.S., Mather T.A., Pyle D.M., Power M., Allen A.G., Aiuppa A., Horwell C.J., Ward E.P.W.* Composition-resolved size distributions of volcanic aerosols in the Mt. Etna plumes // *J. Geophys. Res. D.* 2008. V. 113, N 17. P. 1–17.
7. *Hoskins B.J., Simmons A.J.* A multi-layer spectral model and the semi-implicit method // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 1975. V. 101, N 429. P. 637–655.
8. *URL:* <http://meteo.ru>

*V.V. Zuev, N.E. Zueva, E.S. Saveljeva, A.P. Shelekhov, E.A. Shelekhova.* **The role of tropical stratosphere volcanic heating in appearance of heat centers in the Arctic regions.**

There are systematic temperature increases in stratosphere relative to long-term standard after major volcanic eruptions. The temperature anomalies in stratosphere of tropical belt cause the appearance of heat centers in the Arctic region, which in turn significant reduces ice cover boundaries in the Arctic Ocean. We analyzed the influence of the new temperature contrasts in the stratosphere of the Northern Hemisphere on the climate change in the Arctic regions using the atmospheric general circulation spectral model of intermediate complexity. We investigate the influence of major volcanic eruptions on the temperature changes in tropical stratosphere and surface temperature in the Chukotka Peninsula region. All major volcanogenic aerosol perturbations of stratosphere response within 10 years to surface temperature increases in the heat center on Chukotka Peninsula is showed.