

Долговременные изменения влажностного режима пограничного слоя атмосферы над территорией Сибири. Часть 1. Изменение среднегодовой влажности

В.С. Комаров, Н.Я. Ломакина, С.Н. Ильин, Д.П. Нахтигалова*

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

Поступила в редакцию 27.02.2012 г.

Установлено, что характер изменения среднегодовой влажности в пограничном слое атмосферы Сибири за последние 30 лет в определенной степени повторяет пространственное распределение трендов среднегодовой температуры. Причем, если в его полярных районах (к северу от 70° с.ш.) и субполярной зоне (60–70° с.ш.) Восточной Сибири отмечаются заметное потепление и повышение влажности воздуха, то в той же зоне Западной Сибири имеет место их совместное понижение. В умеренных же широтах Сибирского региона и практически во всем пограничном слое атмосферы изменения среднегодовой влажности не соответствуют изменению среднегодовой температуры (при ее тридцатилетнем повышении влажность воздуха уменьшается). Показано, что в 2001–2010 гг. над большей частью территории Сибири и во всем пограничном слое атмосферы преобладало не только заметное похолодание, но и понижение влажности воздуха.

Ключевые слова: долговременные изменения, линейные тренды, среднегодовая влажность воздуха, пограничный слой атмосферы, регион Сибири; long-term changes, linear trends, average annual air humidity, the atmospheric boundary layer, Siberian region.

Введение

Современное потепление климата Земли, наблюдаемое с середины 70-х гг. XX в., в значительной степени зависит (так считают многие исследователи) от увеличения в атмосфере концентрации так называемых парниковых газов, особенно таких, как двуокись углерода CO_2 и метана CH_4 . Они оказывают существенное влияние на тепловые условия атмосферы и земной поверхности. Однако среди парниковых газов главную роль играют не двуокись углерода и метан, а водяной пар H_2O , или влажность воздуха [1, 2]. Это обусловлено тем, что в атмосфере на водяной пар из всех парниковых газов приходится наибольшее содержание (около 3200 млн^{-1}), намного превышающее современную концентрацию CO_2 и CH_4 , равную 379 млн^{-1} и 1774 млрд^{-1} [2], и данный газ поглощает уходящую от земной поверхности длинноволновую радиацию практически во всем инфракрасном диапазоне [3], удерживая тем самым тепло в приземном слое атмосферы.

Кроме того, преобладающее в последние десятилетия потепление климата сопровождается увеличением влажности воздуха, обусловленным ее тесной

корреляционной связью с температурой, наблюдаемой не только вблизи земной поверхности, но и во всем пограничном слое атмосферы [4]. И наконец, рост содержания водяного пара в пограничном слое атмосферы приводит к увеличению нижней облачности, понижающей величину уходящего теплового излучения [1, 5], создавая тем самым парниковый эффект, проявляющийся наиболее ярко в ночные часы и в зимнее время.

Следовательно, роль водяного пара в создании парникового эффекта действительно очень велика и увеличение его содержания в атмосфере (в том числе и при повышении температуры воздуха) должно обуславливать еще большее потепление климата. Поэтому, как указано в [6], оценка трендов содержания водяного пара в контексте антропогенно обусловленного потепления климата имеет исключительно важное значение, причем не только на глобальном, но и на региональном уровнях.

Однако до сих пор в литературе по метеорологии главное внимание при изучении проблемы глобального потепления климата было направлено на исследование характера долговременных изменений содержания в атмосфере таких парниковых газов, как диоксид углерода и метан, и практически не рассматривались аналогичные изменения концентрации водяного пара, особенно в пограничном слое атмосферы, на который, согласно [7], приходится половина всего его содержания. Имеется лишь ограниченное

* Валерий Сергеевич Комаров (gfm@iao.ru); Наталья Яковлевна Ломакина (lnya@iao.ru); Сергей Николаевич Ильин; Дарья Петровна Нахтигалова.

число публикаций (см., например, [3, 8–11]), посвященных исследованию долговременных изменений влажности воздуха в приземном слое и в свободной атмосфере. И, следовательно, временная динамика изменения содержания H_2O в пограничном слое атмосферы, особенно над таким малоосвещенным регионом, как Сибирь, до настоящего времени еще не изучена (можно упомянуть лишь нашу работу [4], содержащую предварительные и не совсем полные результаты исследований по данной проблеме).

Все это было учтено в наших дальнейших исследованиях, о результатах которых пойдет речь в данной статье, являющейся продолжением работ [12, 13], посвященных анализу особенностей долговременных изменений среднегодовой и среднесезонной температуры воздуха в пограничном слое атмосферы Сибирского региона.

1. Исходные данные и методика их обработки

В качестве исходных данных для решения поставленной проблемы были взяты массивы многолетних (1973–2010 гг.) и двухразовых (00 и 12 ч GMT) радиозондовых наблюдений (<http://www.weather.uwo.edu/>) на 25 аэрологических станциях, представляющих разные широтные зоны:

– полярную ($70–75^\circ$ с.ш.) – Диксон, Хатанга, Тикси;

– субполярную ($60–70^\circ$ с.ш.) – Салехард, Туруханск, Александровское, Бор, Тура, Оленек, Жиганск, Якутск, Олекминск, Верхоянск, Вилюйск, Ванавара;

– умеренную ($50–60^\circ$ с.ш.) – Верхнее Дуброво, Тобольск, Омск, Новосибирск, Енисейск, Киренск, Чара, Нижнеудинск, Багдарин, Чита.

Следует подчеркнуть, что все исходные данные, представленные на главных изобарических поверхностях (1000, 925, 850, 700 гПа) и уровнях особых точек, были предварительно приведены методом линейной интерполяции к системе геометрических высот: 0 (уровень земли), 400, 800 и 1600 м. Кроме того, поскольку данные о влажности были представлены в виде значений точки росы (T_d , °C), то они были пересчитаны в значения массовой доли водяного пара q , %, для чего была использована методика, приведенная в [13].

Что касается методики анализа долговременных изменений влажности воздуха в пограничном слое атмосферы Сибирского региона, то, по аналогии с его температурой (см. [12, 13]), нами в качестве анализируемых параметров взяты среднегодовые и среднесезонные аномалии массовой доли водяного пара $\Delta \bar{q} = \bar{q}_i - \bar{q}$ (\bar{q}_i – их среднегодовые или среднесезонные значения i -го года, а \bar{q} – соответствующая норма в %, рассчитанная для базового периода с 1973 по 1980 г.), а также линейные тренды и интенсивности (%/10 лет) такого изменения, оцененные за 30 лет (1981–2010 гг.) в целом и последние 10 лет (2001–2010 гг.), когда на фоне глобального потепления проявилась тенденция к уменьшению его интенсивности [2, 4, 14].

2. Долговременные изменения аномалий среднегодового содержания водяного пара за 1981–2010 гг.

Рассмотрим вначале тридцатилетние изменения аномалий среднегодового содержания водяного пара, для чего воспользуемся рис. 1–3, где в качестве примера приведены для 6 типичных станций Сибири (Диксон, Тикси, Салехард, Якутск, Омск и Чита) временной ход этих аномалий и их линейные тренды для четырех высотных уровней (0 или «уровень земли», 400, 800 и 1600 м).

Кроме того, воспользуемся и данными табл. 1, содержащей для всех 25 рассматриваемых станций и тех же уровней интенсивности изменения среднегодового содержания водяного пара Δq (%/10 лет) за последние 30 лет. В той же табл. 1 приведены (для сравнения) интенсивности изменения среднегодовой температуры ΔT (°C/10 лет), сведения о которых взяты из [12].

Из анализа рис. 1–3 и табл. 1 следует, что характер линейных трендов аномалий среднегодового содержания водяного пара, полученных для пограничного слоя атмосферы и территории Сибирского региона по данным последних 30 лет, является неоднородным по пространству и в определенной степени повторяет картину пространственного распределения трендов среднегодовой температуры. В частности:

– в полярных широтах Сибирского региона ($70–75^\circ$ с.ш.) и во всем пограничном слое атмосферы отмечаются, как и в случае с температурой, существенные (до $0,06–0,10\%/10$ лет) положительные тренды среднегодовой влажности воздуха (правда, с высотой интенсивность ее изменения заметно уменьшается), т.е. здесь в последние 30 лет отмечается не только потепление, но и увлажнение климата данной территории;

– в субполярных широтах того же региона ($60–70^\circ$ с.ш.) наблюдается иное распределение линейных трендов среднегодовой влажности воздуха по пространству, причем оно характерно для всего пограничного слоя атмосферы и соответствует распределению трендов среднегодовой температуры. Действительно, положительные тренды среднегодовой влажности воздуха в пределах этих широт имеют место, как и у среднегодовой температуры, лишь над территорией Восточной Сибири, где в ряде случаев они могут достигать, особенно вблизи земной поверхности, $0,09–0,12\%/10$ лет. В то же время над территорией Западной Сибири и двух прилегающих районов (ст. Тура и Ванавара), находящаяся в пределах субполярных широт, и во всем пограничном слое атмосферы отмечаются, как и у среднегодовой температуры, отрицательные, хотя и не столь значительные по величине (в основном порядка $-0,03 \div -0,06\%/10$ лет), тренды среднегодового содержания водяного пара;

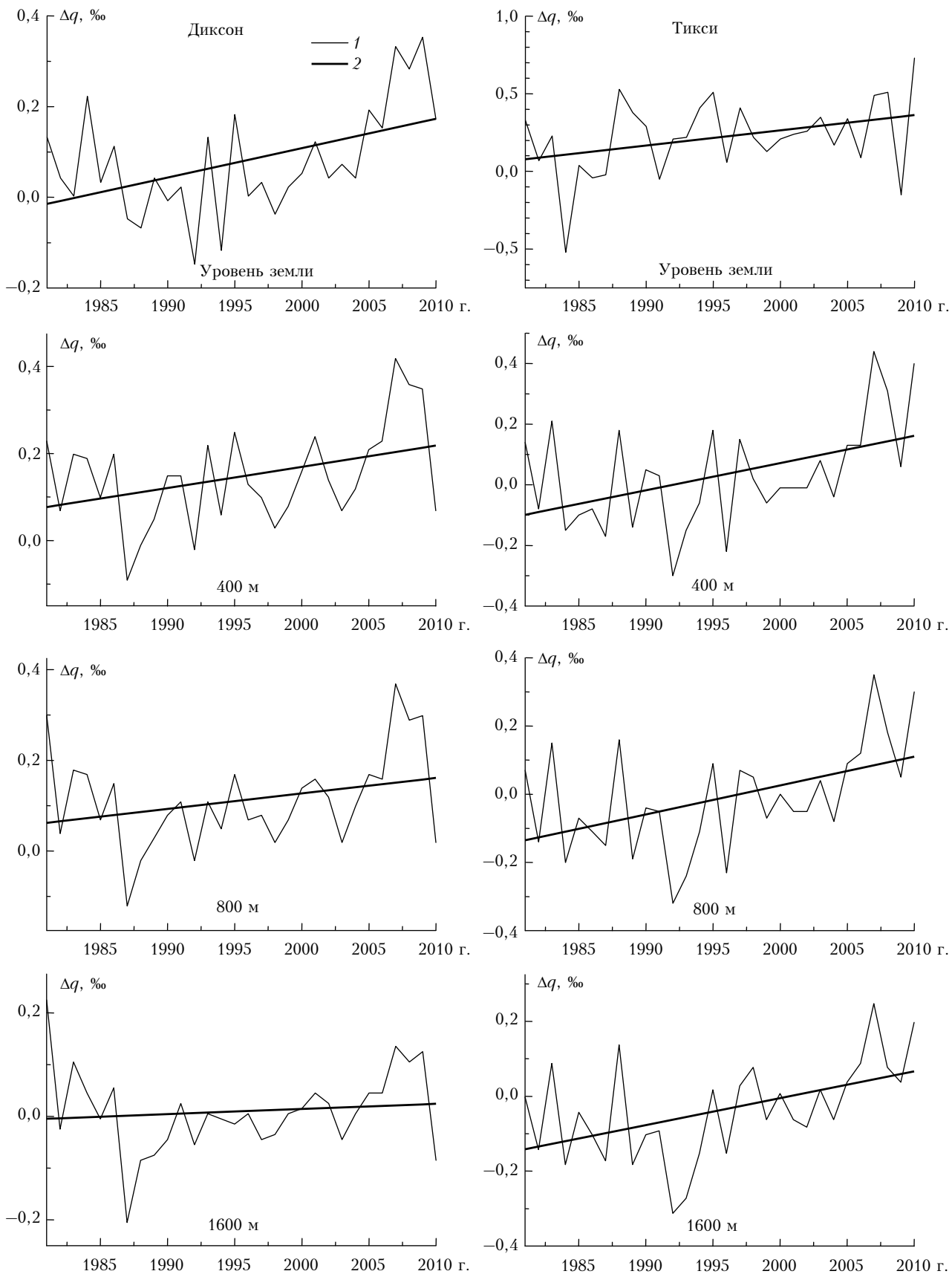


Рис. 1. Межгодовые изменения аномалий среднегодового содержания водяного пара (1) и их линейные тренды (2) в пограничном слое атмосферы для станций Диксон и Тикси

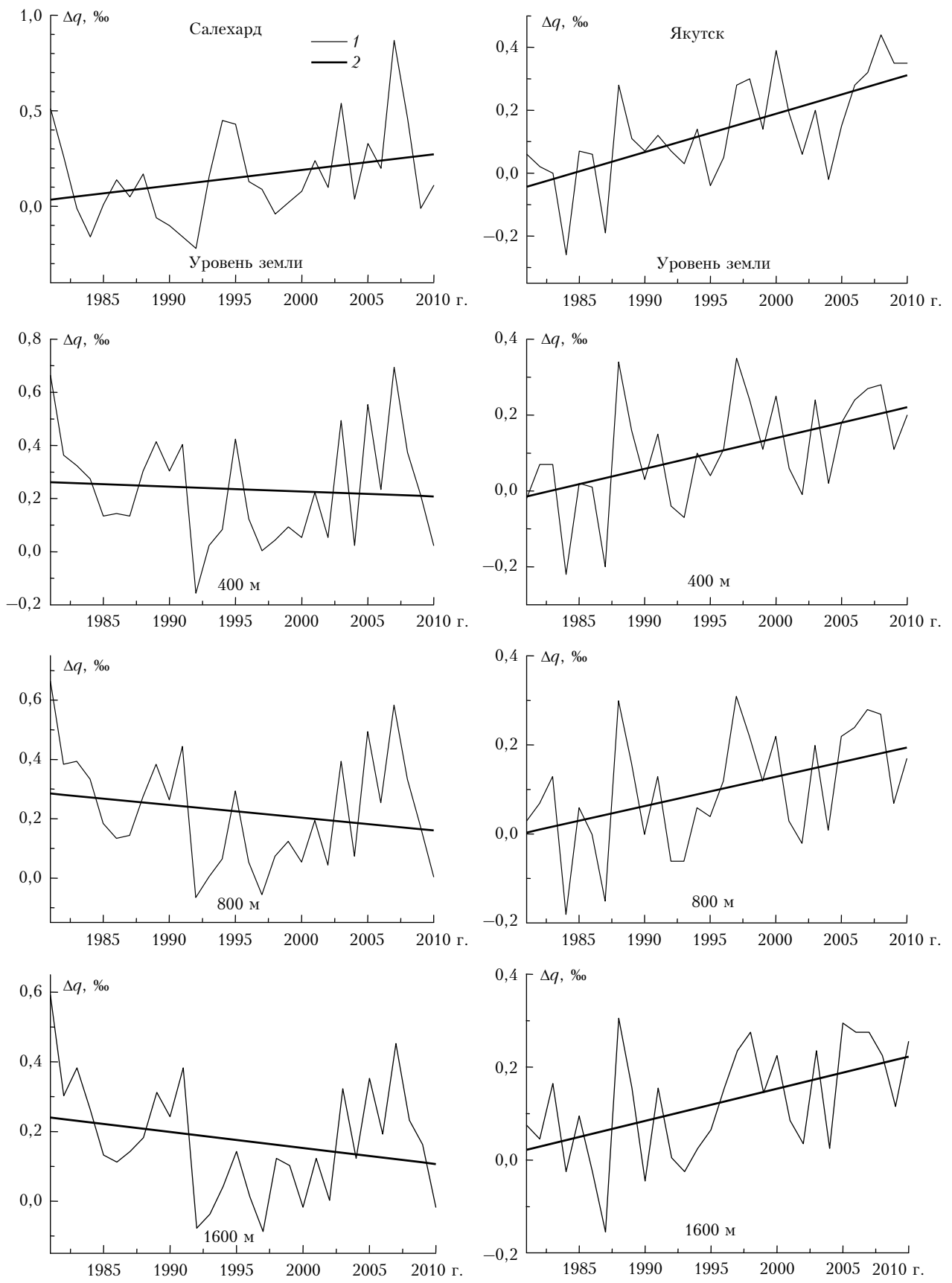


Рис. 2. Межгодовые изменения аномалий среднегодового содержания водяного пара (1) и их линейные тренды (2) в пограничном слое атмосферы для станций Салехард и Якутск

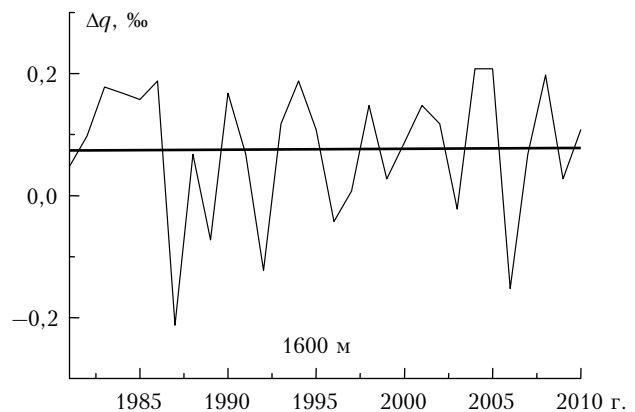
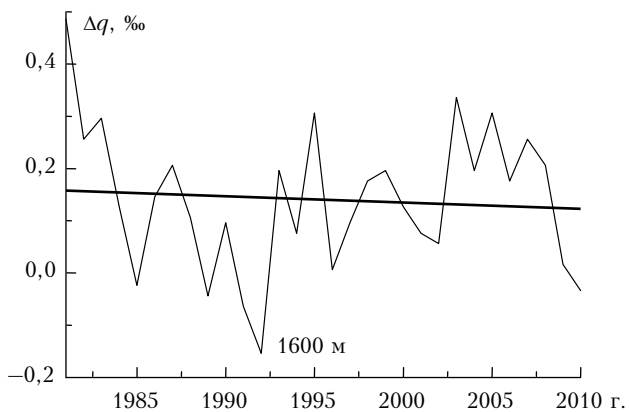
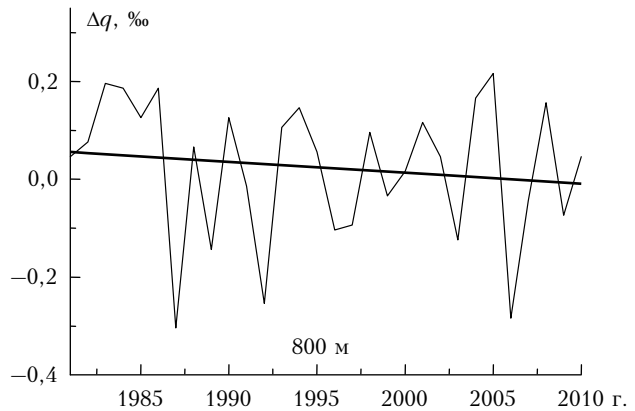
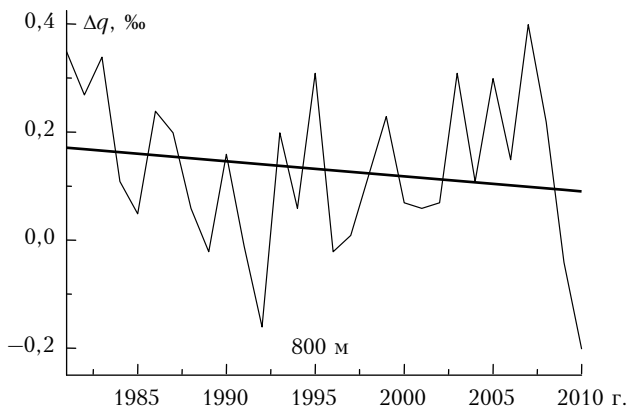
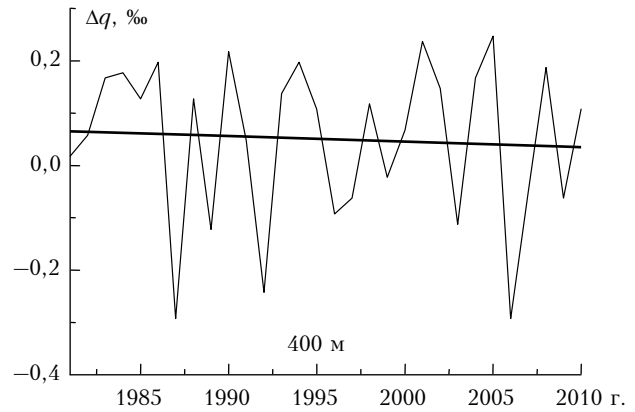
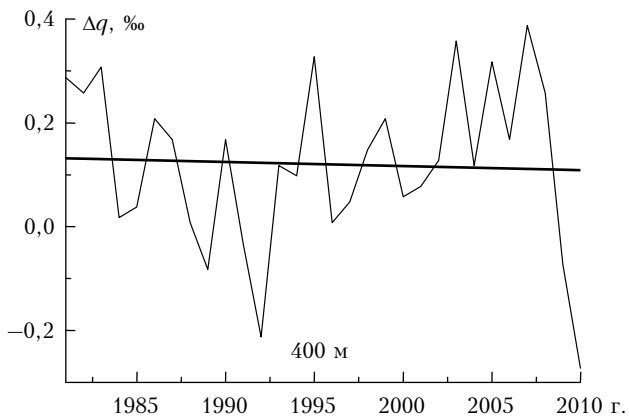
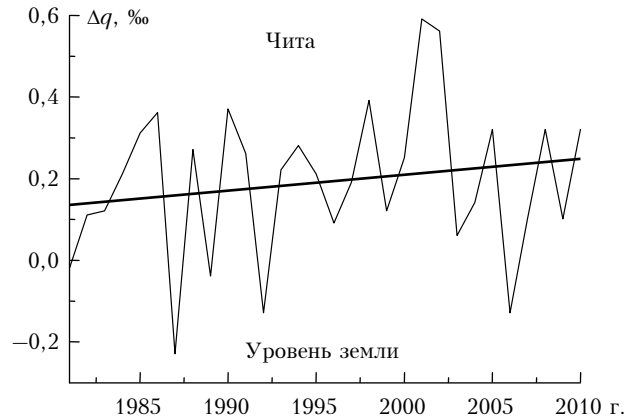
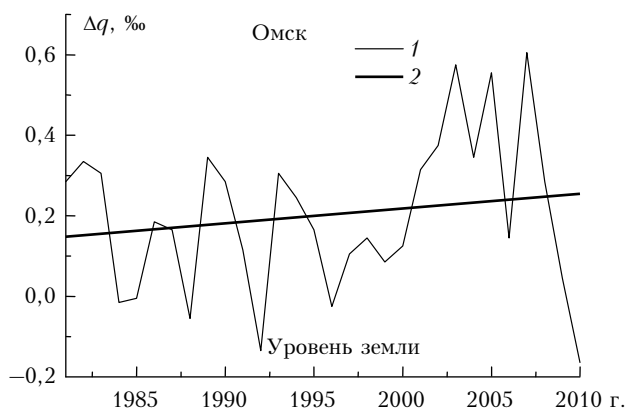


Рис. 3. Межгодовые изменения аномалий среднегодового содержания водяного пара (1) и их линейные тренды (2) в пограничном слое атмосферы для станций Омск и Чита

Таблица 1

Интенсивности изменения среднегодового содержания водяного пара Δq (‰/10 лет) и среднегодовой температуры ΔT (°С/10 лет) на различных высотах пограничного слоя атмосферы Сибирского региона за 1981–2010 гг.

Станция	Высота, м							
	0		400		800		1600	
	Δq	ΔT	Δq	ΔT	Δq	ΔT	Δq	ΔT
<i>Западная Сибирь</i>								
Полярные широты (70–75° с.ш.)								
Диксон	0,06	0,53	0,05	0,39	0,03	0,29	0,01	0,12
Субполярные широты (60–70° с.ш.)								
Салехард	–0,03	–0,08	–0,02	–0,06	–0,04	–0,08	–0,05	–0,08
Туруханск	–0,06	–0,07	–0,02	–0,08	–0,01	–0,04	–0,03	–0,12
Александровское	–0,04	–0,19	–0,01	–0,16	–0,01	–0,05	–0,04	–0,15
Бор	–0,05	–0,26	–0,03	–0,10	–0,05	–0,08	–0,06	–0,20
Умеренные широты (50–60° с.ш.)								
Верхнее Дуброво	0,04	0,18	0,01	0,34	0,03	0,36	0,04	0,35
Тобольск	0,01	0,03	–0,03	0,07	–0,06	0,11	–0,04	0,08
Омск	0,04	0,12	–0,01	0,17	–0,03	0,09	–0,01	0,03
Новосибирск	0,14	0,11	–0,03	0,15	–0,01	0,16	–0,02	0,05
Енисейск	0,07	0,10	–0,07	0,14	–0,05	0,16	–0,04	0,09
<i>Восточная Сибирь</i>								
Полярные широты (70–75° с.ш.)								
Хатанга	0,06	0,19	0,03	0,21	0,02	0,16	0,01	0,12
Тикси	0,10	0,39	0,09	0,49	0,08	0,48	0,07	0,40
Субполярные широты (60–70° с.ш.)								
Тура	–0,07	–0,07	–0,01	–0,09	–0,03	–0,09	–0,04	–0,09
Оленек	0,06	0,48	0,05	0,25	0,04	0,31	0,03	0,24
Жиганск	0,12	0,19	0,07	0,26	0,05	0,39	0,05	0,31
Якутск	0,12	0,73	0,08	0,41	0,07	0,43	0,07	0,43
Олекминск	0,11	0,12	0,04	0,20	0,01	0,33	0,01	0,23
Верхоянск	0,09	0,22	0,03	0,16	0,01	0,28	0,01	0,18
Вилуйск	0,04	0,41	0,01	0,38	0,02	0,41	0,01	0,27
Ванавара	–0,08	–0,08	–0,08	–0,03	–0,04	–0,01	–0,01	–0,01
Умеренные широты (50–60° с.ш.)								
Киренск	–0,04	0,11	–0,01	0,26	–0,02	0,29	–0,04	0,23
Чара	–0,02	0,12	–0,02	0,09	–0,02	0,06	–0,02	0,02
Нижнеудинск	–0,05	0,12	–0,01	0,07	–0,01	0,03	–0,01	0,05
Багдарин	–0,09	0,12	–0,04	0,04	–0,05	0,07	–0,03	0,19
Чита	–0,02	0,46	–0,01	0,35	–0,02	0,25	–0,01	0,17

– и наконец, в умеренных широтах Сибирского региона (50–60° с.ш.), где взаимная корреляция влажности воздуха с его температурой является довольно слабой [4], почти повсеместно преобладают не положительные, как у температуры, а отрицательные, хотя и незначительные по величине (в основном не более $-0,04 \div -0,07\%$ /10 лет), тренды среднегодовой влажности. Лишь на территории Западной Сибири, да и то только вблизи земной поверхности, наблюдаются, как и у температуры, положительные тренды среднегодового содержания водяного пара.

Следовательно, в умеренных широтах Сибирского региона и во всем пограничном слое атмосферы тридцатилетние изменения среднегодового содержания водяного пара, за редким исключением, не соответствуют аналогичному изменению среднегодовой температуры.

3. Изменение среднегодового содержания водяного пара в 2001–2010 гг.

Поскольку в 2001–2010 гг. проявилась тенденция к понижению среднегодовой температуры, как в пределах всего Северного полушария, так и в отдельных его регионах [2, 12, 14], представляет большой интерес оценить степень влияния этого понижения на изменения среднегодового содержания водяного пара, наблюдаемые в пограничном слое атмосферы над территорией Сибири. С этой целью воспользуемся табл. 2, где для всех 25 рассматриваемых станций и четырех уровней (0, 400, 800 и 1600 м) даются сведения об интенсивностях изменения (с 2001 по 2010 г.) среднегодового содержания водяного пара Δq (‰/10 лет) и, для сравнения, среднегодовой температуры ΔT (°С/10 лет), которые заимствованы из [12].

Таблица 2

Интенсивности изменения среднегодового содержания водяного пара Δq (‰/10 лет) и среднегодовой температуры ΔT (°C/10 лет) в пограничном слое атмосферы Сибирского региона за 2001–2010 гг.

Станция	Высота, м							
	0		400		800		1600	
	Δq	ΔT	Δq	ΔT	Δq	ΔT	Δq	ΔT
<i>Западная Сибирь</i>								
Полярные широты (70–75° с.ш.)								
Диксон	0,27	2,34	0,14	0,83	0,13	0,69	0,04	0,15
Субполярные широты (60–70° с.ш.)								
Салехард	-0,01	-0,07	-0,02	-0,22	-0,01	-0,05	-0,01	-0,16
Туруханск	-0,18	-0,01	-0,07	-0,44	-0,08	-0,35	-0,12	-0,42
Александровское	-0,02	-0,76	-0,12	-1,07	-0,11	-0,79	-0,12	-0,87
Бор	-0,05	-0,33	-0,17	-1,30	-0,15	-0,76	-0,13	-0,92
Умеренные широты (50–60° с.ш.)								
Верхнее Дуброво	-0,19	-0,15	-0,07	-0,81	-0,07	-1,25	-0,01	-1,46
Тобольск	-0,04	-0,16	-0,08	-0,22	-0,16	-0,42	-0,11	-0,43
Омск	-0,47	-0,44	-0,27	-0,81	-0,17	-0,73	-0,11	-0,63
Новосибирск	-0,18	-0,93	-0,16	-1,00	-0,13	-0,79	-0,13	-0,61
Енисейск	-0,18	-0,65	-0,10	-1,52	-0,08	-1,35	-0,01	-1,11
<i>Восточная Сибирь</i>								
Полярные широты (70–75° с.ш.)								
Хатанга	0,35	1,63	0,12	0,82	0,08	0,48	0,01	0,13
Тикси	0,18	2,50	0,41	1,86	0,36	1,96	0,27	1,67
Субполярные широты (60–70° с.ш.)								
Тура	-0,01	-0,68	-0,04	-1,33	-0,04	-0,50	-0,02	-0,49
Оленек	0,04	0,28	0,06	0,24	0,04	0,26	0,04	0,10
Жиганск	0,31	0,92	0,26	0,85	0,23	0,95	0,19	0,90
Якутск	0,35	0,81	0,19	0,24	0,19	0,40	0,17	0,31
Олекминск	0,10	0,36	0,13	0,33	0,18	0,27	0,21	0,27
Верхоянск	0,47	2,33	0,39	0,33	0,33	0,36	0,29	1,07
Вилуйск	0,38	1,06	0,09	0,79	0,02	0,87	0,01	0,74
Ванавара	-0,38	-1,42	-0,08	-1,05	-0,05	-1,12	-0,02	-0,91
Умеренные широты (50–60° с.ш.)								
Киренск	-0,52	-2,01	-0,26	-1,75	-0,17	-1,25	-0,11	1,10
Чара	-0,07	-0,52	-0,03	-0,44	-0,03	-0,46	-0,03	-0,18
Нижнеудинск	-0,02	-0,96	-0,09	-1,66	-0,04	-1,27	-0,02	-1,10
Багдарин	-0,22	-0,75	-0,13	-1,25	-0,12	-1,13	-0,09	-0,27
Чита	-0,36	-1,07	-0,18	-1,38	-0,09	-1,24	-0,05	-1,09

Анализ табл. 2 показывает, что характер пространственного распределения интенсивности изменения среднегодового содержания водяного пара, оцененной для пограничного слоя атмосферы Сибирского региона по данным 2001–2010 гг., имеет определенные особенности, которые в значительной степени повторяют характер распределения интенсивности изменения за тот же период среднегодовой температуры. Действительно, из табл. 2 хорошо видно, что:

– в полярных широтах Сибирского региона в последние 10 лет наряду с заметным повышением среднегодовой температуры отмечался также и значительный рост среднегодового содержания водяного пара, интенсивность которого достигает в ряде случаев 0,35–0,40‰/10 лет. Однако с высотой интенсивность роста среднегодового содержания H_2O значительно уменьшается и на уровне 1600 м достигает в основном 0,01–0,04‰/10 лет;

– в субполярных широтах того же региона наблюдалась иная картина: если в последнем десяти-

летии на этих широтах в Западной Сибири и в прилегающих районах Восточной Сибири (ст. Тура и Ванавара) во всем пограничном слое атмосферы преобладало (при понижении среднегодовой температуры) заметное (до $-0,20 \div -0,47\%$ /10 лет) уменьшение среднегодового содержания водяного пара, то над территорией Восточной Сибири (к востоку от 105° в.д.) уже отмечался, как и у среднегодовой температуры, его повсеместный рост;

– и наконец, в умеренных широтах всего Сибирского региона и во всем пограничном слое атмосферы в последние 10 лет наблюдалось, как и у среднегодовой температуры, повсеместное уменьшение среднегодового содержания водяного пара, интенсивность которого на некоторых станциях (Омск, Киренск, Чита) и отдельных высотных уровнях достигала примерно $-0,30 \div -0,50\%$ /10 лет.

Из сказанного выше следует, что в 2001–2010 гг. над большей частью Сибирского региона и во всем пограничном слое атмосферы преобладало не только

заметное похолодание, но и уменьшение среднегодового содержания водяного пара.

1. Кондратьев К.Я. Глобальный климат // Итоги науки и техники. Серия «Метеорология и климатология». М.: ВИНТИ, 1987. Т. 17. 313 с.
2. Переведенцев Ю.П. Теория климата. Казань: Изд-во Казан. госун-та, 2009. 504 с.
3. Исаев А.А. Экологическая климатология. М.: Научный мир, 2001. 458 с.
4. Комаров В.С., Ломакина Н.Я., Лавриненко А.В., Ильин С.Н. Изменения климатов пограничного слоя атмосферы Сибири в период глобального потепления. Часть 2. Аномалии и тренды влажности воздуха // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 11. С. 951–956.
5. Ипполитов И.И., Кабанов М.А., Логинов С.А., Соколов К.И., Харюткина Е.В. Изменчивость составляющих теплового баланса поверхности азиатской территории России в период современного глобального потепления // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 1. С. 22–29.
6. Грассль Х., Кондратьев К.Я. Изменения глобального климата в контексте глобальной экодинамики. СПб., 1993. 195 с.
7. Хромов С.П., Петросяц М.А. Метеорология и климатология. М.: Изд-во МГУ; Колос-С, 2001. 582 с.
8. Караханян А.А., Жеребцов Г.А., Коваленко В.А., Молодых С.И., Васильева Л.А. Долговременные изменения характеристик влажности воздуха на территории Северного полушария во второй половине XX в. // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20, № 6. С. 559–566.
9. Майстрова В.В., Колони Р., Нагурный А.П., Макштас А.П. Долговременные тренды температуры и удельной влажности свободной атмосферы северной полярной области // Докл. РАН. 2003. Т. 391, № 1. С. 112–116.
10. Кузнецова В.Н., Швець Н.В. Анализ изменений режима влажности воздуха на территории России // Тр. ГУ «ВНИИГМИ-МЦД». 2010. Вып. 175. С. 65–75.
11. Черных И.В., Алдухов О.А. Тренды температуры и содержания водяного пара в тропосфере над Западно-Сибирским районом Арктики // Тр. ГУ «ВНИИГМИ-МЦД». 2010. Вып. 175. С. 174–188.
12. Комаров В.С., Лавриненко А.В., Ильин С.Н., Ломакина Н.Я., Горев Е.В. Долговременные изменения температуры в пограничном слое атмосферы над территорией Сибири. Часть 1. Изменение среднегодовой температуры // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 8. С. 684–690.
13. Комаров В.С., Ломакина Н.Я. Статистические модели пограничного слоя атмосферы Западной Сибири. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2008. 222 с.
14. Шерстюков Б.Г., Салугавили Р.С. Новые тенденции в изменениях климата Северного полушария Земли в последнее десятилетие // Тр. ГУ «ВНИИГМИ-МЦД». 2010. Вып. 175. С. 43–51.

V.S. Komarov, N.Ya. Lomakina, S.N. Il'in, D.P. Nakhtigalova. Long-term changes of humidity conditions within the atmospheric boundary layer over Siberia. Part 1. Changes of annual average humidity.

It has been found that the type of change of annual average humidity within the atmospheric boundary layer of Siberia for the last 30 years approximately repeats the spatial distribution of annual average temperature. In this case while the appreciable warming and air humidity rising is observed in the polar regions (70°N) and in the subpolar zone (60–70°N) of Eastern Siberia, their synchronous fall is occurred in the same zone of West Siberia. Changes of annual average humidity do not correspond to the changes of annual average temperature (at 30-year increase of temperature, the humidity decreases) in the moderate zone of Siberian region practically within the all atmospheric boundary layer. It is shown that in 2001–2010 the appreciable fall of air temperature and humidity predominates in the all atmospheric boundary layer of the most part of Siberia.