

УДК 551.52; 551.57; 519.28

Особенности вертикальной структуры полей температуры и влажности воздуха в пограничном слое атмосферы над Восточной Сибирью в зависимости от его облачного состояния.

Часть 2. Характеристики вертикальной корреляции

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

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

Поступила в редакцию 8.10.2012 г.

По данным многолетних (2002–2012 гг.) наблюдений четырех аэрологических станций (Тура, Якутск, Киренск и Чита), представляющих различные физико-географические районы Восточной Сибири, исследованы общие закономерности и особенности межуровневых и взаимнокорреляционных связей температуры и влажности воздуха (массовой доли водяного пара) в пограничном слое атмосферы в зависимости от степени закрытия небосвода облаками нижнего яруса.

Ключевые слова: авто- и взаимнокорреляционные функции, температура, влажность воздуха, пограничный слой атмосферы, Восточная Сибирь, ясные и пасмурные дни; autocorrelation and cross-correlation functions, temperature, air humidity, the atmospheric boundary layer, East Siberia, clear and cloudy days.

Введение

В первой части настоящей статьи [1] приводятся результаты статистического анализа особенностей вертикальной структуры полей температуры и влажности воздуха, наблюдаемых в пограничном слое атмосферы Восточной Сибири в условиях отсутствия или преобладания облаков нижнего яруса типа *St*, *Sc*, *Ns*, причем подобный анализ был осуществлен с помощью двух климатических показателей: средних (фоновых) значений и дисперсий. Однако известно, что для полного описания статистической структуры любого метеорологического поля необходимо использовать еще и корреляционные функции [2]. В нашем случае эти статистические параметры, рассчитанные с учетом облачного состояния нижней атмосферы, необходимы еще и потому, что они широко используются (совместно со средними значениями и дисперсиями) при интерпретации данных дистанционного зондирования окружающей среды, осуществляемого как с поверхности Земли, так и из космоса [3, 4].

Учитывая все вышесказанное, а также почти полное отсутствие публикаций по исследуемой проблеме, исключая работу [5], в которой проведена оценка влияния облачности нижнего яруса на корреляционные связи температуры и влажности воздуха в пограничном слое атмосферы для Западной Си-

бири, в настоящей статье приводятся результаты такой же оценки для Восточной Сибири.

1. Исходные данные и некоторые вопросы расчета корреляционных функций

Основным исходным материалом для анализа особенностей корреляционных связей температуры и влажности воздуха (массовой доли водяного пара) в зависимости от облачного состояния пограничного слоя атмосферы послужили, как и в работе [1], многолетние (2002–2012) двухразовые (00 и 12 ч GMT) метеорологические наблюдения (по ним определялись даты и сроки отсутствия (0–2 балла) или наличия сплошной (8–10 баллов) облачности нижнего яруса), а также соответствующие им радиозондовые измерения высотных профилей температуры и влажности воздуха, полученные для января и июля по данным четырех станций Восточной Сибири: Тура, Якутск, Киренск и Чита, которые представляют различные физико-географические районы этой части Сибирского региона.

Подчеркнем, что данные радиозондирования, определяемые только для стандартных изобарических поверхностей: 1000, 925, 850 и 700 гПа и уровней особых точек, были предварительно приведены (с помощью метода линейной интерполяции) к системе заданных геометрических высот: 0, 100, 200, 300, 400, 600, 800, 1000, 1200 и 1600 м.

Что касается самого статистического анализа особенностей межуровневой и взаимной корреляции

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

температуры и влажности воздуха, оцениваемой для пограничного слоя атмосферы с учетом облачного состояния атмосферы, то с этой целью в настоящей статье использованы соответствующие нормированные автокорреляционные $r_{\xi\xi}(h_i, h_j)$ и взаимокорреляционные $r_{\xi\psi}(h_i, h_j)$ функции.

2. Особенности межуровневой корреляции температуры и влажности воздуха в зависимости от облачного состояния атмосферы

Рассмотрим результаты статистического анализа основных закономерностей и особенностей кор-

реляционных связей температуры и влажности воздуха (массовой доли водяного пара), которые имеют место в пограничном слое атмосферы Восточной Сибири в дни с отсутствием (0–2 балла) и наличием (8–10 баллов) облаков нижнего яруса. С этой целью воспользуемся данными табл. 1 и 2, в которых приводятся значения коэффициентов межуровневой корреляции температуры $r_{TT}(h_i, h_j)$ и влажности воздуха $r_{qq}(h_i, h_j)$, рассчитанные с учетом облачного состояния атмосферы для четырех аэрологических станций Восточной Сибири: Тура, Якутск, Киренск и Чита.

Отметим, что в этих таблицах в качестве примера дается для каждой станции и месяца не полная корреляционная матрица, имеющая 10-й порядок, а матрица 5-го порядка, построенная по данным 5 высотных уровней: 0 (уровень станции), 200, 400,

Таблица 1

Коэффициенты межуровневой корреляции температуры $r_{TT}(h_i, h_j) \cdot 10^3$ при отсутствии облаков нижнего яруса (ясно) или наличии сплошной облачности (пасмурно)

Высота, м	Состояние атмосферы											
	Ясно					Пасмурно						
	0	200	400	800	1200	1600	0	200	400	800	1200	1600
<i>Тура</i>												
	Январь					Январь						
0	1000	908	806	585	511	431	1000	928	840	656	567	513
200	967	1000	933	623	551	447	976	1000	942	697	597	524
400	897	942	1000	854	604	523	910	972	1000	907	641	610
800	744	794	917	1000	886	741	803	888	956	1000	914	856
1200	719	769	822	938	1000	931	782	809	874	951	1000	943
1600	613	663	774	862	955	1000	678	749	805	887	973	1000
	Июль					Июль						
<i>Якутск</i>												
	Январь					Январь*						
0	1000	818	621	494	461	392	1000	—	—	—	—	—
200	957	1000	856	657	525	406	977	1000	—	—	—	—
400	930	974	1000	826	581	409	956	988	1000	—	—	—
800	884	909	953	1000	808	598	901	929	961	1000	—	—
1200	846	865	905	969	1000	900	849	877	913	976	1000	—
1600	775	820	854	920	969	1000	790	837	863	933	979	1000
	Июль					Июль						
<i>Киренск</i>												
	Январь					Январь						
0	1000	924	702	514	406	374	1000	901	744	573	461	390
200	971	1000	932	676	516	451	979	1000	939	785	662	556
400	866	946	1000	838	652	564	913	973	1000	924	796	680
800	685	793	913	1000	890	798	836	909	967	1000	918	805
1200	623	727	849	972	1000	902	806	873	933	979	1000	922
1600	590	683	792	916	966	1000	801	853	901	935	972	1000
	Июль					Июль						
<i>Чита</i>												
	Январь					Январь						
0	1000	888	722	323	216	191	1000	810	653	420	313	282
200	979	1000	925	574	441	399	988	1000	940	765	675	648
400	912	958	1000	799	670	620	935	979	1000	921	854	822
800	713	781	906	1000	930	880	834	894	957	1000	969	933
1200	648	718	855	962	1000	974	797	854	919	976	1000	980
1600	596	664	798	914	980	1000	746	799	861	925	989	1000
	Июль					Июль						

* Январские данные о межуровневой корреляции в пасмурные дни для ст. Якутск не приводятся из-за малого числа имевшихся наблюдений ($n = 10$) при сплошной облачности нижнего яруса.

Таблица 2

**Коэффициенты межуровневой корреляции влажности воздуха $r_{qq}(h_i, h_j) \cdot 10^3$
при отсутствии облаков нижнего яруса (ясно) или наличии
сплошной облачности (пасмурно)**

Высота, м	Состояние атмосферы											
	Ясно						Пасмурно					
	0	200	400	800	1200	1600	0	200	400	800	1200	1600
	<i>Тура</i>											
	Январь						Январь					
0	1000	903	804	563	496	407	1000	926	832	681	558	498
200	954	1000	941	703	526	501	977	1000	972	772	692	593
400	880	956	1000	839	635	518	944	985	1000	885	783	679
800	782	865	926	1000	808	630	864	897	942	1000	836	685
1200	687	740	808	938	1000	909	755	778	840	953	1000	934
1600	658	708	762	826	908	1000	730	745	781	845	920	1000
	Июль						Июль					
	<i>Якутск</i>											
	Январь						Январь*					
0	1000	732	558	493	479	433	1000	—	—	—	—	—
200	859	1000	791	604	483	394	938	1000	—	—	—	—
400	802	949	1000	806	598	443	860	969	1000	—	—	—
800	746	844	948	1000	817	638	783	866	956	1000	—	—
1200	675	786	818	924	1000	884	691	805	852	934	1000	—
1600	609	715	740	857	934	1000	632	746	782	877	942	1000
	Июль						Июль					
	<i>Киренск</i>											
	Январь						Январь					
0	1000	927	782	551	476	460	1000	929	835	714	633	569
200	865	1000	929	697	578	532	898	1000	961	858	741	650
400	792	963	1000	848	681	588	861	985	1000	933	796	671
800	767	855	934	1000	857	716	794	873	939	1000	893	746
1200	754	778	837	924	1000	888	758	798	840	940	1000	901
1600	741	764	799	866	935	1000	751	768	813	877	944	1000
	Июль						Июль					
	<i>Чита</i>											
	Январь						Январь					
0	1000	820	640	329	319	345	1000	860	699	462	415	382
200	916	1000	900	577	504	478	927	1000	963	855	785	709
400	873	977	1000	802	690	632	873	982	1000	940	878	805
800	808	911	948	1000	898	811	821	928	957	1000	958	903
1200	784	876	905	948	1000	928	800	882	905	971	1000	966
1600	731	801	818	857	952	1000	754	823	836	908	966	1000
	Июль						Июль					

* Январские данные о межуровневой корреляции в пасмурные дни для ст. Якутск не приводятся из-за малого числа имевшихся наблюдений ($n = 10$) со сплошной облачностью нижнего яруса.

800 и 1600 м. При этом в каждой таблице в связи с известной симметричностью автокорреляционных матриц $\|r_{ij}\|_{\xi\xi}$ приводятся не одна, а две матрицы, одна из которых (для января) представлена над главной диагональю, а вторая (для июля) — под этой диагональю.

Из анализа данных табл. 1 и 2, а также и другого имеющегося в нашем распоряжении статистического материала следует, что коэффициенты межуровневой корреляции температуры и влажности воздуха, рассчитанные для дней с отсутствием облаков нижнего яруса (т.е. для условий «ясной» атмосферы) и дней с преобладанием сплошной облачности типа St , Sc и Ns (пасмурных дней), имеют почти одинаковый вертикальный ход, который к тому же является аналогичным ходу коэффициентов корреляции $r_{TT}(h_i, h_j)$ и $r_{qq}(h_i, h_j)$, полученных независимо

от облачного состояния нижней атмосферы (см., например, [6]). А именно: корреляционные связи между вариациями температуры и влажности воздуха у земли (или на других исходных уровнях) и на всех вышерасположенных уровнях ПСА, как в ясные дни, так и в дни с преобладанием сплошной облачности нижнего яруса, являются в оба рассматриваемых сезона положительными во всем пограничном слое атмосферы и заметно ослабевают с высотой по мере увеличения расстояния между коррелируемыми уровнями. Однако подобное ослабление межуровневых корреляционных связей происходит с различной интенсивностью в зависимости от облачного состояния пограничного слоя атмосферы. В частности, зимой над всей территорией Восточной Сибири межуровневые корреляционные связи между вариациями температуры и влажности воздуха у земли и на

вышерасположенных уровнях наиболее быстро ослабевают в дни с отсутствием облаков нижнего яруса (это соответствует условию «ясно»). Действительно, если зимой при отсутствии облаков нижнего яруса уже к уровню 800 м коэффициенты межуровневой корреляции температуры $r_{TT}(h_0, h_{800})$ и влажности воздуха $r_{qq}(h_0, h_{800})$ существенно уменьшаются (до 0,32–0,58 и 0,33–0,56 соответственно), то при наличии сплошной облачности типа *St*, *Sc*, *Ns* они уменьшаются менее интенсивно, имея к уровню 800 м значения 0,42–0,66 и 0,46–0,71. В то же время летом в безоблачные дни эти коэффициенты достигают заметно больших, чем зимой, значений (порядка 0,71–0,88 для температуры и 0,75–0,80 для влажности воздуха), однако и в данный сезон они по своей величине также меньше, чем в дни с преобладанием сплошной облачности, когда их значения равняются 0,83–0,90 и 0,78–0,86 соответственно.

Следует отметить, что более интенсивное ослабление (по сравнению с пасмурными днями) межуровневых корреляционных связей температуры и влажности воздуха, наблюдаемое зимой при отсутствии облаков нижнего яруса, обусловлено, как уже отмечалось ранее в [5], нарушением этих связей в результате воздействия на них мощных температурных инверсий, развивающихся в это время года над холодной подстилающей поверхностью в условиях господства Сибирского антициклона. Летом в «ясные» дни из-за отсутствия подобных инверсий такая особенность в поведении межуровневой корреляции температуры и влажности воздуха не наблюдается, а это сказывается и на уменьшении ее различий с корреляцией, оцененной для дней со сплошной облачностью.

Описанные выше особенности характерны также и для межуровневых корреляционных связей температуры и влажности воздуха, полученных для других исходных высот ($h_i \geq 200$ м). При этом их «теснота» по-прежнему более высокая в пасмурные дни и существенно возрастает (уже для обоих состояний нижней облачности) с повышением исходного уровня. Так, например, коэффициенты межуровневой корреляции температуры $r_{TT}(h_i, h_j)$ и влажности воздуха $r_{qq}(h_i, h_j)$ при $h_i = 1200$ м и $h_j = 1600$ м рав-

няются, причем повсеместно и независимо от сезона, 0,88–0,98 в безоблачных условиях и 0,90–0,99 в пасмурные дни.

Таковы главные особенности влияния облаков нижнего яруса на межуровневые корреляционные связи температуры и влажности воздуха, которые характерны для пограничного слоя атмосферы Восточной Сибири.

3. Особенности взаимокорреляционных связей температуры и влажности воздуха в зависимости от облачного состояния атмосферы

Известно, что между температурой и влажностью воздуха в пограничном слое атмосферы существуют тесные корреляционные связи [6, 7]. Однако до сих пор они недостаточно изучены, особенно для такой территории, как Восточная Сибирь, а также зависят от облачного состояния нижней атмосферы. Учитывая это, авторами настоящей статьи были проведены соответствующие исследования, о результатах которых и пойдет речь ниже.

В табл. 3 в качестве примера приведены значения коэффициентов взаимной корреляции температуры с влажностью воздуха $r_{Tq}(h_i, h_j)$ для одного и того же уровня, из которой следует, что для высотного распределения этих коэффициентов характерны некоторые общие (для всей Восточной Сибири) особенности.

В частности, зимой во всем пограничном слое атмосферы Восточной Сибири взаимокорреляционные связи температуры с влажностью воздуха, оцененные для одного и того же высотного уровня, являются наиболее тесными в дни с преобладанием сплошной облачности нижнего яруса. При этом если в отсутствие нижней облачности значения коэффициентов корреляции $r_{Tq}(h_i, h_j)$ варьируют в пределах 0,74–0,94, то при сплошной облачности – 0,82–0,95, причем в обоих случаях они уменьшаются с высотой.

Таблица 3

Коэффициенты взаимной корреляции температуры с влажностью воздуха $r_{Tq}(h_i, h_j) \cdot 10^3$, полученные при отсутствии облаков нижнего яруса (ясно) или наличии сплошной облачности (пасмурно) для различных станций Восточной Сибири

Станция	Состояние атмосферы											
	Ясно						Пасмурно					
	Высота, м											
	0	200	400	800	1200	1600	0	200	400	800	1200	1600
<i>Зима</i>												
Тура	894	910	903	892	837	757	906	932	920	905	874	792
Якутск	937	920	905	895	813	754	—	—	—	—	—	—
Киренск	893	904	925	917	829	753	935	952	945	938	895	867
Чита	942	920	921	891	822	745	950	937	929	914	903	887
<i>Лето</i>												
Тура	339	341	388	474	535	601	485	504	533	575	637	735
Якутск	333	378	347	389	445	475	511	498	469	449	524	625
Киренск	375	182	171	316	383	434	653	608	638	632	598	568
Чита	158	102	136	251	366	488	224	144	187	293	395	530

Подобный характер поведения коэффициентов взаимной корреляции $r_{Tq}(h_i, h_j)$ в зимний период определяется тем, что в пасмурные дни, когда над территорией Восточной Сибири наблюдается адвекция теплых и влажных воздушных масс, любое повышение температуры сопровождается увеличением влагосодержания атмосферного воздуха. В то же время в дни с отсутствием облаков нижнего яруса, когда господствует антициклонный режим погоды, не всякое повышение или понижение температуры воздушной массы, например при ее адиабатическом перемещении, сопровождается изменением влажности.

Летом наиболее тесные корреляционные связи температуры с влажностью воздуха также отмечаются при наличии сплошной облачности, однако в отличие от зимнего периода коэффициенты взаимной корреляции $r_{Tq}(h_i, h_j)$ не уменьшаются, а возрастают с высотой.

Эти особенности в распределении коэффициентов взаимной корреляции $r_{Tq}(h_i, h_j)$ над территорией Восточной Сибири, свойственные для летнего периода, обусловлены, в отличие от зимы, несколькими иными факторами. Так, если в «пасмурные» дни относительно высокая корреляция обусловлена той же адвекцией воздушных масс, которая обеспечивает, как правило, один и тот же знак изменения температуры и влажности воздуха в пограничном слое атмосферы, то в «ясные» дни при возрастании роли суточного хода и конвективного переноса вверх тепла и влаги от земной поверхности, являющейся повсеместно малоувлажненной, особенно на юге Восточной Сибири (ст. Чита), не всякое повышение приземной температуры и температуры пограничного слоя в целом сопровождается увеличением влажности воздуха.

Таковы некоторые особенности, свойственные взаимнокорреляционным связям температуры с влажностью воздуха в пограничном слое атмосферы Восточной Сибири, оцененные для дней с отсутствием облаков нижнего яруса и дней со сплошной облачностью.

1. Комаров В.С., Ильин С.Н., Ломакина Н.Я., Нактигалова Д.П. Вертикальная структура полей температуры и влажности воздуха в пограничном слое атмосферы над Восточной Сибирью при наличии сплошной облачности нижнего яруса или полном ее отсутствии. Часть 1. Фоновые характеристики и изменчивость // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 3. С. 230–234.
2. Гандин Л.С., Каган Р.Л. Статистические методы интерпретации метеорологических данных. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 359 с.
3. Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М. Метеорологическое зондирование атмосферы из космоса. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 280 с.
4. Зуев В.Е., Зуев В.В. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы. СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. 232 с.
5. Комаров В.С., Ломакина Н.Я. О влиянии облачности нижнего яруса на корреляционные связи температуры и влажности в пограничном слое атмосферы Западной Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 1. С. 27–31.
6. Комаров В.С., Ломакина Н.Я. Статистические модели пограничного слоя атмосферы Западной Сибири. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2008. 221 с.
7. 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.

V.S. Komarov, S.N. Il'in, N.Ya. Lomakina, D.P. Nakhtigalova. Features of the vertical structure of air temperature and humidity fields within the atmospheric boundary layer above East Siberia depending on cloudiness conditions. Part 2. Characteristics of vertical correlation.

According to the data of many-years (2002–2012) observations of four aerological stations (Tura, Yakutsk, Kirensk and Chita), representing different physical-geographical regions of East Siberia, the general regularities and features of interlevel and cross-correlation relations of air temperature and humidity (specific humidity) in the atmospheric boundary layer are analyzed depending on the degree of the sky coverage with lower clouds.