

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

Часть 1. Фоновые характеристики и изменчивость

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 Восточной Сибири (Тура, Якутск, Киренск, Чита) исследуется вертикальная статистическая структура полей температуры и влажности воздуха (массовой доли водяного пара) в пограничном слое атмосферы в условиях сплошного закрытия неба облаками нижнего яруса и, для сравнения, при их полном отсутствии. Рассмотрены (с учетом облачного состояния атмосферы) особенности высотного распределения фоновых (средних климатических) характеристик и дисперсий температуры и влажности воздуха до высоты 1600 м в зависимости от сезона и географического положения станции.

Ключевые слова: фоновые характеристики, изменчивость, температура, влажность воздуха, пограничный слой атмосферы, Восточная Сибирь, сплошная облачность нижнего яруса; background characteristics, variability, temperature, air humidity, the atmospheric boundary layer, Eastern Siberia, heavy overcast.

Введение

Решение различного рода прикладных задач и (в частности таких, как дистанционное зондирование окружающей среды из космоса [1] и оптическое зондирование атмосферы с помощью лидарных систем наземного базирования [2]) требует существенного расширения наших знаний о вертикальной статистической структуре полей температуры и влажности воздуха в пограничном слое атмосферы (ПСА). При этом сведения о подобной структуре должны быть получены не только независимо от облачного состояния атмосферы, но и для условий появления в ней сплошной облачности нижнего яруса (Sc , St , Ns).

Это обусловлено тем, что при появлении подобной облачности (а она наблюдается в основном в пограничном слое атмосферы, т.е. на высотах ниже 2 км [3]) на пути распространения видимого и инфракрасного излучения существенно ухудшается качество решения обратных задач дистанционного зондирования атмосферы или даже становится совершенно невозможным само такое зондирование в подоблачном слое (при спутниковом зондировании) и надоблачном слое (при применении наземных лидарных систем) [1, 2].

Поэтому на практике для улучшения качества решения обратных задач и повышения эффективности функционирования систем дистанционного зондирования атмосферы в облачных условиях обычно используются либо более адекватная априорная статистическая информация о вертикальной структуре полей температуры и влажности воздуха, полученная с учетом наличия в ПСА сплошной облачности нижнего яруса, либо один из методов численного восстановления этих полей в подоблачном или надоблачном слое. В последнем случае обычно используется метод многомерной экстраполяции (см., например, [4, 5]), базирующийся на применении той же статистической информации, которая включает в себя климатические нормы (средние), дисперсии и матрицы межуровневой корреляции.

В связи с этим возникает большая необходимость в детальном исследовании влияния сплошной облачности нижнего яруса (в сравнении со случаем ее полного отсутствия) на вертикальную структуру полей температуры и влажности воздуха в пограничном слое атмосферы, особенно над такой малоосвещенной территорией, как регион Сибири.

Учитывая это, специалистами Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН стали проводиться (начиная с 2008 г.) широкие исследования по изучению особенностей вертикальной структуры полей температуры и влажности воздуха в пограничном слое атмосферы над территорией Сибирского региона в условиях ясной погоды и при наличии

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

сплошной облачности нижнего яруса. Их результатом стали две публикации [6, 7], в которых приведены статистические данные об особенностях вертикальной структуры полей температуры и влажности воздуха в условиях безоблачной атмосферы и наличия сплошной облачности нижнего яруса, которые получены для пограничного слоя атмосферы Западной Сибири.

В настоящей статье, являющейся результатом наших дальнейших исследований по рассматриваемой проблеме, приводятся новые данные об особенностях этой же структуры, но выявленных в пограничном слое атмосферы уже над территорией Восточной Сибири.

1. Характеристика исходного материала и методика его обобщения

Основным исходным материалом для настоящего исследования послужили многолетние (2002–2012 гг.) двухразовые (00 и 12 ч GMT) метеорологические наблюдения за облачностью (<http://meteo.infospace.ru>), по которым определялись даты и сроки появления сплошных облаков нижнего яруса (8–10 баллов) или их полного отсутствия (0–2 балла), а также соответствующие им радиозондовые измерения температуры и влажности воздуха (<http://www.weather.uwo.edu/>), полученные для зимы (январь) и лета (июль) по данным четырех станций Восточной Сибири: Тура (64°16' с.ш., 100°14' в.д.), Якутск (62°05' с.ш., 129°45' в.д.), Киренск (57°45' с.ш., 108°03' в.д.) и Чита (52°05' с.ш., 113°29' в.д.), представляющих ее различные физико-географические районы. Поскольку радиозондовые измерения не позволяют непосредственно оценивать температуру и влажность воздуха в ПСА по данным учащенных высот (в нашем случае к ним относятся: 0 (уровень станции), 100, 200, 300, 400, 600, 800, 1000, 1200 и 1600 м), то для их оценки был использован метод линейной интерполяции данных со стандартных изобарических поверхностей (1000, 925, 850, 700 гПа) и уровней особых точек на заданные геометрические высоты.

Кроме того, в качестве характеристики влажности воздуха в работе использована массовая доля водяного пара (q , %), непосредственно не измеряемая. Поэтому для ее вычисления взята известная процедура [8], основанная на применении проинтерполированных значений атмосферного давления и точки росы.

Для анализа особенностей вертикальной структуры полей температуры и влажности воздуха в пограничном слое атмосферы Восточной Сибири, проведенного для условий сплошного закрытия неба облаками нижнего яруса (и, для сравнения, при полном их отсутствии), были использованы средние значения $\bar{\xi}$ и стандартные (среднеквадратические) отклонения σ_{ξ} , с помощью которых оценивались фоновое состояние и изменчивость указанных полей.

И наконец, следует отметить, что поскольку число наблюдений за состоянием атмосферы со сплошной облачностью или с полным ее отсутствием заметно колеблется в зависимости от сезона и геогра-

фического положения станции, то оно может стать меньше некоторого допустимого порога, равного 10 наблюдениям (для оценки средних значений) и 30 наблюдениям (для расчета дисперсий) [9], а это не позволит получить надежные (со статистической точки зрения) оценки значений взятых климатических показателей. Однако в нашем случае число использованных наблюдений в основном намного больше и поэтому оно позволяет получить надежные оценки средних значений и дисперсий температуры и влажности воздуха в условиях различного облачного состояния атмосферы.

2. Особенности вертикальной структуры средних полей температуры и влажности в пограничном слое атмосферы в зависимости от ее облачного состояния

Известно, что основные черты вертикальной структуры любого метеорологического поля наиболее ярко выявляются при статистическом анализе его фоновых характеристик, отображающих главные закономерности, которые свойственны данному полю. С учетом этого обстоятельства рассмотрим вначале результаты статистического анализа вертикальной структуры полей температуры и влажности воздуха в пограничном слое атмосферы Восточной Сибири на примере их фоновых характеристик, полученных для условий полного отсутствия облаков нижнего яруса или наличия сплошной облачности. С этой целью воспользуемся табл. 1, в которой приводятся вертикальные профили средних значений (климатических норм) температуры \bar{T} (°C) и влажности воздуха (массовой доли водяного пара) \bar{q} (%) для безоблачных условий, т.е. при полном отсутствии нижней облачности и условий сплошного закрытия неба облаками нижнего яруса, которые получены в результате статистического осреднения многолетних данных четырех аэрологических станций Восточной Сибири (Тура, Якутск, Киренск, Чита).

Из анализа табл. 1 видно, что для высотного распределения средних значений температуры и влажности воздуха, определенного с учетом облачного состояния атмосферы, характерны некоторые общие закономерности, которые четко проявляются в пограничном слое над всей территорией Восточной Сибири.

В частности, зимой при условии полного отсутствия облаков нижнего яруса (в нашем случае это соответствует состоянию «ясно») отчетливо проявляются мощные инверсии температуры и влажности воздуха, которые охватывают весь пограничный слой атмосферы (до максимально рассматриваемой высоты 1600 м) на территориях, находящихся к северу от 60-й параллели (см. данные станций Тура и Якутск), где наиболее ярко проявляются процессы радиационного выхолаживания и высушивания приземного слоя в условиях господства Сибирского антициклона.

Таблица 1

Средние значения температуры (\bar{T} , °С) и влажности воздуха (\bar{q} , %) при отсутствии облаков нижнего яруса (ясно – я) или наличии сплошной облачности (пасмурно – п)

Станция	Высота, м										
	0	100	200	300	400	600	800	1000	1200	1600	
<i>Январь</i>											
Температура											
Тура	я	-34,2	-32,9	-31,2	-29,4	-27,7	-25,2	-23,3	-22,0	-21,1	-21,0
	п	-30,3	-27,9	-25,3	-23,5	-21,9	-19,8	-18,4	-17,7	-17,6	-18,3
Якутск	я	-38,2	-37,3	-35,7	-33,8	-32,1	-29,4	-26,9	-25,2	-24,1	-23,5
	п	-32,4	-32,0	-30,6	-28,8	-26,8	-23,0	-19,8	-18,6	-18,4	-20,0
Киренск	я	-33,9	-31,6	-29,6	-27,7	-26,2	-24,1	-22,8	-21,9	-21,4	-21,8
	п	-16,2	-15,7	-15,5	-15,4	-15,7	-16,3	-16,9	-17,4	-17,8	-18,8
Чита	я	-26,8	-24,1	-22,2	-21,1	-20,4	-19,8	-19,4	-19,4	-19,8	-21,1
	п	-15,7	-13,1	-12,1	-11,9	-12,1	-13,0	-13,8	-14,7	-15,8	-18,1
Влажность воздуха											
Тура	я	0,22	0,25	0,29	0,34	0,39	0,48	0,57	0,64	0,69	0,69
	п	0,32	0,38	0,46	0,53	0,60	0,71	0,82	0,88	0,91	0,87
Якутск	я	0,12	0,13	0,15	0,19	0,23	0,31	0,38	0,44	0,49	0,50
	п	0,19	0,20	0,21	0,27	0,34	0,52	0,68	0,73	0,73	0,61
Киренск	я	0,24	0,29	0,34	0,40	0,45	0,54	0,59	0,62	0,63	0,59
	п	1,03	1,03	1,04	1,04	1,02	0,99	0,98	0,97	0,95	0,90
Чита	я	0,41	0,51	0,59	0,65	0,68	0,72	0,73	0,74	0,71	0,63
	п	1,10	1,25	1,30	1,32	1,31	1,25	1,20	1,17	1,09	0,93
<i>Июль</i>											
Температура											
Тура	я	18,4	17,9	17,4	16,8	16,2	15,4	14,4	13,0	11,5	8,5
	п	14,9	14,4	13,9	13,4	12,9	11,8	10,7	9,6	8,5	6,0
Якутск	я	22,7	22,1	21,5	21,0	20,5	19,4	18,0	16,4	14,9	11,8
	п	19,3	18,7	18,1	17,6	17,0	16,0	14,8	13,6	12,4	10,0
Киренск	я	18,9	18,7	18,6	18,5	18,3	17,9	16,8	15,4	14,0	11,2
	п	17,2	16,4	15,8	15,3	14,9	13,9	12,7	11,6	10,4	8,2
Чита	я	20,4	19,7	19,2	18,5	17,8	17,1	16,2	14,9	13,5	10,5
	п	19,1	18,6	18,0	17,5	16,8	15,9	14,7	13,4	12,1	9,4
Влажность воздуха											
Тура	я	7,38	7,16	7,12	7,08	7,06	6,73	6,34	5,98	5,66	5,08
	п	8,29	8,03	7,80	7,61	7,44	7,09	6,77	6,52	6,37	5,88
Якутск	я	8,86	8,23	7,78	7,46	7,19	6,80	6,51	6,14	5,90	5,44
	п	9,87	9,58	9,28	9,01	8,78	8,37	8,08	7,76	7,50	7,01
Киренск	я	10,01	9,25	8,80	8,52	8,25	7,71	7,27	6,90	5,56	5,95
	п	10,77	10,11	9,68	9,37	9,07	8,61	8,18	7,78	7,41	6,81
Чита	я	9,15	8,65	8,42	8,23	8,03	7,61	7,18	6,86	6,58	6,06
	п	10,46	9,91	9,56	9,29	9,04	8,57	8,15	7,85	7,56	7,05

К югу от 60-й параллели (станции Киренск и Чита) максимальная высота этих инверсий несколько меньше (1000–1200 м), но и здесь она заметно выше, чем это имело место над территорией Западной Сибири, где инверсия температуры достигла высоты 800–1000 м, а влажности воздуха только 600–800 м [6]. При наличии же сплошной облачности нижнего яруса отмечается несколько иная картина. Если к северу от 60-й параллели также наблюдаются хорошо выраженные инверсии температуры и влажности воздуха, достигающие высоты 1200 м, то к югу от нее, где возрастает роль циклонической циркуляции, подобные инверсии проявляются лишь в самом нижнем 300-метровом слое атмосферы.

Наряду с этим нужно обратить внимание также и на следующую закономерность. При отсутствии в пограничном слое атмосферы облаков нижнего яруса (закрытие неба соответствующими облаками составляет 0–2 балла) значения средней температуры и влажности воздуха существенно ниже, чем при наличии сплошной облачности (8–12 баллов), причем наибольшие различия (правда, лишь в слое 0–600 м) наблюдаются южнее 60-й параллели, где они могут достигать 10–18 °С для температуры и 0,60–0,80% для влажности воздуха.

Летом в дни с отсутствием облаков нижнего яруса на всех высотах пограничного слоя атмосферы (из-за хорошо развитого его турбулентного и кон-

вективного переноса от сильно прогретой и мало увлажненной земной поверхности) воздух значительно теплее и суше, чем в случае преобладания сплошной облачности, когда ярко проявляется циклоническая деятельность. При этом наблюдаемые различия по температуре, причем повсеместно и независимо от высоты, значительно меньше, чем зимой (порядка 1,0–3,5 °С). Кроме того, летом, в отличие от зимы, над всей территорией Восточной Сибири отмечается уменьшение температуры и влажности воздуха с высотой.

3. Особенности изменчивости полей температуры и влажности воздуха в пограничном слое атмосферы в зависимости от ее облачного состояния

Известно, что сведения о высотном распределении средней температуры и влажности воздуха не дают полного представления об особенностях вертикальной структуры полей этих метеорологических величин. Поэтому в климатологии принято использовать также и параметры изменчивости того же метеорологического поля, в качестве которых обычно применяются значения стандартного (среднего квадратического) отклонения σ_ξ [10]. С учетом этого в табл. 2 приведены вертикальные профили стандартных отклонений температуры σ_T (°С) и влажности воздуха (массовой доли водяного пара) σ_q (‰), рассчитанных в зависимости от облачного состояния атмосферы для тех же станций Восточной Сибири и сезонов.

Из анализа данных табл. 2 хорошо видно, что для вертикального распределения стандартных отклонений температуры и влажности воздуха в пограничном слое атмосферы Восточной Сибири характерны следующие особенности.

Во-первых, зимой в дни с отсутствием облаков нижнего яруса выделяется слой повышенной изменчивости температуры и влажности воздуха, расположенный повсеместно вблизи земной поверхности и формируемый под воздействием двух факторов, а именно: с одной стороны, за счет сильного радиационного выхолаживания и высушивания воздуха в приземном слое атмосферы в условиях господства Сибирского антициклона, а с другой — за счет притока в рассматриваемый регион воздушных масс с более высокой температурой и влажностью в процессе межширотного и меридионального обмена [11].

Летом в дни с отсутствием облачности нижнего яруса приземный слой повышенной изменчивости температуры и влажности воздуха сохраняется, однако он формируется под воздействием суточного хода этих метеорологических величин. Что касается дней со сплошной облачностью, то и в эти дни, причем и зимой и летом, приземный максимум изменчивости температуры и влажности воздуха также наблюдается.

Во-вторых, если зимой во всем пограничном слое атмосферы изменчивость температуры в дни с отсутствием облаков нижнего яруса существенно выше, а влажности воздуха, наоборот, заметно ниже, чем в дни со сплошной облачностью, то летом наибольшая изменчивость в ясные дни характерна уже для обеих метеорологических величин, исключая лишь ее значения для влажности воздуха в районе ст. Чита, где они больше в дни со сплошной облачностью.

Таблица 2

Стандартные отклонения температуры (σ_T , °С) и влажности воздуха (σ_q , ‰) при отсутствии облаков нижнего яруса (я) или наличии сплошной облачности (п)

Станция	Высота, м										
	0	100	200	300	400	600	800	1000	1200	1600	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
<i>Январь</i>											
Температура											
Тура	я	9,7	9,0	8,7	8,1	7,5	6,7	6,3	6,0	5,9	5,8
	п	8,6	7,8	7,2	6,3	5,5	4,2	4,4	4,6	4,6	4,4
Якутск	я	6,4	6,1	5,8	5,7	5,4	5,4	5,3	5,1	5,0	4,9
	п	3,5	2,9	2,8	2,9	3,8	3,9	4,0	4,2	4,2	4,4
Киренск	я	8,4	8,1	7,8	7,7	7,5	7,4	7,1	6,7	6,5	6,2
	п	7,2	6,1	5,4	5,0	4,9	5,0	5,1	5,2	5,3	4,7
Чита	я	7,9	6,2	5,8	5,5	5,2	5,1	5,0	4,9	4,8	4,5
	п	6,9	5,8	5,2	4,8	4,6	4,4	4,5	4,6	4,4	4,3
Влажность воздуха											
Тура	я	0,27	0,25	0,27	0,29	0,30	0,33	0,35	0,36	0,36	0,35
	п	0,30	0,28	0,29	0,31	0,33	0,35	0,36	0,37	0,37	0,39
Якутск	я	0,08	0,07	0,09	0,11	0,13	0,17	0,19	0,20	0,21	0,21
	п	0,09	0,08	0,12	0,15	0,18	0,22	0,25	0,26	0,28	0,29
Киренск	я	0,35	0,30	0,32	0,33	0,35	0,37	0,35	0,33	0,30	0,26
	п	0,57	0,50	0,46	0,43	0,42	0,41	0,41	0,39	0,40	0,34
Чита	я	0,28	0,26	0,28	0,29	0,29	0,29	0,30	0,30	0,30	0,27
	п	0,57	0,51	0,46	0,45	0,44	0,40	0,42	0,43	0,44	0,43

1		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<i>Июль</i>											
Температура											
Тура	я	7,1	7,0	6,8	6,4	6,1	5,8	5,7	5,6	5,5	5,1
	п	4,5	4,4	4,4	4,4	4,4	4,5	4,6	4,4	4,4	4,1
Якутск	я	5,9	5,8	5,6	5,4	5,3	5,3	5,3	5,2	5,1	4,8
	п	4,8	4,7	4,9	5,0	5,1	5,2	5,1	4,9	4,8	4,4
Киренск	я	5,6	5,5	5,3	5,0	4,9	4,8	4,7	4,6	4,5	4,3
	п	4,5	4,4	4,5	4,5	4,6	4,6	4,6	4,5	4,4	4,2
Чита	я	5,2	5,1	5,0	4,7	4,6	4,5	4,4	4,2	4,1	3,9
	п	4,7	4,6	4,6	4,5	4,5	4,4	4,3	4,1	3,9	3,6
Влажность воздуха											
Тура	я	2,27	2,20	2,19	2,17	2,16	2,13	1,94	1,80	1,67	1,56
	п	2,14	2,06	2,01	1,98	1,97	1,96	1,90	1,76	1,61	1,54
Якутск	я	2,53	2,42	2,38	2,32	2,28	2,27	2,15	2,09	1,98	1,90
	п	2,33	2,27	2,23	2,22	2,20	2,17	2,10	2,02	1,90	1,85
Киренск	я	2,24	2,09	2,08	2,08	2,07	2,06	2,05	1,96	1,90	1,82
	п	2,15	1,91	1,83	1,76	1,73	1,72	1,64	1,58	1,53	1,49
Чита	я	2,03	1,97	1,96	1,96	1,96	1,94	1,88	1,74	1,64	1,49
	п	2,26	2,16	2,14	2,14	2,13	2,10	2,04	1,92	1,79	1,51

В-третьих, если зимой в пограничном слое атмосферы изменчивость температуры, причем независимо от облачного состояния, понижается с высотой, а вариации влажности воздуха в основном возрастают (исключая пасмурные дни в районах, расположенных южнее 60° с.ш., где они уменьшаются), то летом изменчивость обеих метеорологических величин повсеместно и независимо от облачного состояния с высотой уменьшается.

Таковы главные особенности, которые были выявлены в процессе физико-статистического анализа фоновых характеристик и параметров изменчивости температуры и влажности воздуха, оцененных для пограничного слоя атмосферы Восточной Сибири с учетом различной степени покрытия неба облаками нижнего яруса.

1. Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М. Метеорологическое зондирование атмосферы из космоса. Л.: Гидрометеоздат, 1978. 280 с.
2. Зуев В.Е., Зуев В.В. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы. СПб.: Гидрометеоздат, 1992. 232 с.
3. Облака и облачная атмосфера: Справочник / Под ред. И.П. Мазина и Ах. Хргиана. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 647 с.
4. Комаров В.С. Некоторые результаты оценки восстановления профиля температуры в подоблачном слое атмо-

сферы по данным спутниковой информации и априорной статистики // Труды ВНИИГМИ МЦД. 1977. Вып. 42. С. 21–26.

5. Акселевич В.Я. Физико-статистические методы восстановления параметров состояния тропосферы в задачах атмосферного мониторинга и военной геофизики: Автореф. дис. ... канд.-физ. наук. СПб.: РГГМИ, 1994. 16 с.
6. Комаров В.С., Ломакина Н.Я., Ильин С.Н. Вертикальная структура полей температуры и влажности в пограничном слое атмосферы над Западной Сибирью в условиях ясной погоды и наличия сплошной облачности // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 9. С. 849–852.
7. 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.
8. Комаров В.С., Ломакина Н.Я. Статистические модели пограничного слоя атмосферы Западной Сибири. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2008. 221 с.
9. Brooks C.E., Carruthers N. Handbook of statistical methods in meteorology. Her Majesty's Stationary office, 1953. 412 p.
10. Кобышева Н.В., Наровлянский Г.Я. Климатическая обработка метеорологической информации. Л.: Гидрометеоздат, 1978. 295 с.
11. Гутерман И.Г. Средний и турбулентный перенос субстанций над СССР // Труды ИЭМ. 1971. Вып. 21. С. 47–62.

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 1. Background characteristics and variability.

The vertical statistical structure of air temperature and humidity (specific humidity) fields within the atmospheric boundary layer of East Siberia are analyzed for cloudless conditions and heavy overcast, using many-year (2002–2012) data of four aerological stations (Tura, Yakutsk, Kirensk, Chita). The features of the altitudinal distribution of the background (average climatic) characteristics and the dispersions of air temperature and humidity are considered up to a height of 1600 meters with the account of cloud state of the atmosphere and depending on the season and geographical location of the station.