

*Н.Ш. Гусейнов*

**ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ  
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ**

*N.Sh. Guseinov*

**VERTICAL DISTRIBUTION  
OF METEOROLOGICAL PARAMETERS  
IN THE ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER**

*По данным радиозондирования атмосферы рассчитаны вертикальные градиенты температуры, относительная влажность, вертикальные сдвиги вектора ветра и число Ричардсона как в период существования низких облаков высотой  $\leq 300$  м, так и в период отсутствия низкой облачности при адвекции холода и тепла. Установлено, что при низкой облачности в случаях адвекции холода в большинстве случаев вертикальные градиенты температуры превышают  $0,5$  °C/100 м, при адвекции тепла в основном наблюдается инверсия или изотермия.*

*Результаты расчетов числа Ричардсона показали, что в целом нижний 500-метровый слой атмосферы характеризуется высоким уровнем турбулентной энергии, и анализ распределения значений вертикальных сдвигов ветра показал, что наиболее турбулентными являются нижние 180 м, а выше турбулентность ослабевает.*

*Based on radiosonde observations of the atmosphere, vertical temperature gradients, relative humidity, vertical wind shears and the Richardson number have been calculated both for conditions with low clouds at a height of  $\leq 300$  m and during absence of low clouds at cold- and warm-air advection. It was established that at low cloudiness, in case of cold-air advection, vertical temperature gradients in most cases exceed  $0,5$  °C/100 m, and at warm-air advection, either inversion or isothermal condition was mainly observed.*

*The calculation results of the Richardson number showed that as a whole the lower 500-meter atmosphere is characterized by a high level of turbulent energy. An analysis of distribution of the magnitude of vertical wind shears indicated that the most turbulized layers are the lower 180-m ones, and the turbulence weakens above that level.*

Для изучения особенностей вертикального распределения метеорологических параметров в пограничном слое атмосферы в районе Апшеронского полуострова были использованы данные радиозондирования атмосферы в пункте Баку. По этим данным с помощью ЭВМ были рассчитаны следующие основные характеристики пограничного слоя атмосферы: вертикальные градиенты температуры, относительная влажность, вертикальные сдвиги вектора ветра и число Ричардсона. Указанные параметры рассматривались в зависимости от направления переноса (характера адвекции) по двум слоям различной толщины, а именно: Земля – 180 м, 180 – 500 м. Высоты 180 и 500 м являются средними высотами поверхностей 1000 и 950 гПа соответственно в периоды наблюдений, включенных в рассмотрение.

Анализ аэрологических данных производился как в период существования низких облаков высотой  $\leq 300$  м (271 случай) и за 6 ч до их появления (105 слу-

чаев), так и в период отсутствия низкой облачности (173 случая). Для 73 случаев указанные параметры рассчитывались при рассеянии низких облаков.

Из многих источников известно, что низкая облачность в большинстве случаев связана с наличием инверсии, располагаясь или непосредственно под ней, или частично, а то и полностью, захватывая инверсию. Высота расположения инверсии в значительной мере зависит от уровня турбулентной энергии в нижнем слое атмосферы. В связи с этим представляет интерес рассмотреть особенности стратификации нижних слоев в случаях низких облаков в изучаемом районе. Рассчитанные с этой целью вертикальные градиенты температуры в двух указанных выше слоях и при разных направлениях ветра приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Повторяемость (%) различных градаций вертикального градиента температуры в случаях низких облаков и средние значения до появления, в периоды существования и отсутствия низких облаков**

Направление ветра	Границы слоев, м	Вертикальный градиент температуры, °С/100 м						Число случаев	Средние значения		
		$\leq -1,0$	$-0,9 \div -0,5$	$-0,4 \div 0,0$	$0,1 \div 0,4$	$0,5 \div 0,9$	$\geq 1,0$		За 6 ч до появления низких облаков	В период существования низких облаков	При отсутствии низких облаков
Северное	0–180	1	3	15	27	42	12	176	0,37	0,36	0,60
	180–150	3	8	11	21	46	11	176	0,35	0,29	0,65
Южное	0–180	9	14	29	25	22	1	95	0,32	–0,04	0,39
	180–500	13	18	28	19	20	2	95	0,18	–0,39	0,45

Анализ данных таблицы показывает, что в случаях адвекции холода инверсия и изотермия как в нижнем, так и в верхнем слоях наблюдаются редко (в 19 и 22 % случаев соответственно), и больше чем в половине случаев градиенты температуры превышают 0,5 °С/100 м; в 12 % случаев они были  $\geq 1$  °С/100 м. Специальный просмотр последних случаев показал, что указанные значения вертикальных градиентов температуры наблюдались при интенсивном вторжении холода, причем преобладающей формой облачности были кучево-дождевые.

При адвекции тепла преобладала устойчивая стратификация, повторяемость инверсии и изотермии в обоих слоях составила более половины всех случаев (52 % в нижнем и 59 % в верхнем слоях). Причиной этого является, по-видимому, значительное преобладание случаев внутримассовой низкой облачности и адвективных туманов.

Заметим, что в дни отсутствия низких облаков инверсия и изотермия наблюдались в слое 180 – 500 м при адвекции холода в 6 % случаев, при адвекции тепла в 16 % случаев.

Для оценки влияния влагосодержания как облакообразующего фактора рассмотрено распределение по высоте относительной влажности. В табл. 2 приведены средние значения относительной влажности на границах рассматриваемых слоев.

Таблица 2

Средние значения относительной влажности (%)

Направление ветра	За 6 ч до появления низкой облачности на высотах, м			В период существования низкой облачности на высотах, м			В дни без низкой облачности на высотах, м		
	0	180	500	0	180	500	0	180	500
Северное	83	81	93	93	92	91	78	74	74
Южное	82	79	78	93	92	89	72	70	68

Приведенные данные свидетельствуют о том, что в периоды существования низких облаков относительная влажность превышает 90 % практически на всех уровнях. При этом за предшествующие появлению облаков 6 ч относительная влажность повышалась на всех высотах в среднем на 10 – 13 %.

Средние значения относительной влажности за 6 ч до появления низкой облачности также достаточно высоки, причем при адвекции холода на уровне 500 м значение выделяется из всех других (93 %). По-видимому, это можно объяснить большой повторяемостью низкой облачности за холодными фронтами, в зоне которых наблюдается низкая облачность высотой  $\leq 300$  м.

В дни без низких облаков значения относительной влажности существенно ниже ее значений не только в случаях низкой облачности, но и за 6 ч до ее появления. В связи с такими различиями значений, очевидно, относительную влажность можно отнести к числу возможных предикторов при разработке метода прогноза низких облаков.

Турбулентный обмен является одним из основных процессов, определяющих изменения температуры и влажности в механизме образования низкой облачности [1 – 8]. Оценка турбулентного обмена производится с помощью коэффициента турбулентности  $k$  или числа Ричардсона  $Ri$ . Коэффициент турбулентности  $k$  обычно используется в экспериментальных исследованиях из-за сложности его расчетов, требующих специальных наблюдений, например данных самолетного зондирования атмосферы. Кроме того, пока не существует даже примерной оценки значений  $k$ , определяющих его вклад в изменения, например стратификации нижних слоев атмосферы. В связи с этим для оценки уровня турбулентной энергии в изучаемом районе было использовано число Ричардсона  $Ri$ , относительно которого известно, что показателем интенсивного турбулентного обмена является  $Ri < 1$ . Кроме того, существуют [Абрамович, 1973] «критические» значения вертикального сдвига ветра, обеспечивающие интенсивный турбулентный обмен при различных значениях вертикального градиента температуры: при  $1\text{ }^\circ\text{C} \geq \gamma > 0,4\text{ }^\circ\text{C}$  сдвиг ветра  $\frac{\partial v}{\partial z}$  должен быть  $\geq 1\text{ c}^{-1} \cdot 10^{-2}$ ; при  $0,4\text{ }^\circ\text{C} \geq \gamma > 0\text{ }^\circ\text{C}$  – равен  $2\text{ c}^{-1} \cdot 10^{-2}$ ; при  $\gamma \leq 0^\circ$  – не менее  $3\text{--}4\text{ c}^{-1} \cdot 10^{-2}$ .

Расчеты  $Ri$  производились по указанным выше двум слоям, отдельно для случаев северного и южного направлений ветра (адвекции холода и тепла) как в периоды существования низкой облачности, так и при отсутствии последней.

В результате расчетов  $Ri$  оказалось, что в целом весь нижний 500-метровый слой атмосферы характеризуется высоким уровнем турбулентной энергии: во всех случаях адвекции холода и тепла, при наличии и отсутствии низких обла-

ков, значения  $Ri < 1$ , причем в преобладающем числе случаев не более 0,4. Поэтому соответствующая этим данным таблица здесь не приводится. По-видимому, больший интерес представляет рассмотрение определяющих столь высокий уровень турбулентности значений, в частности, вертикальных сдвигов ветра (табл. 3).

Таблица 3

**Повторяемость (%) значений вертикального сдвига ветра при адвекции холода (северном ветре) и тепла (южном ветре)**

Направление ветра	Условия отбора данных наблюдений	Границы слоя, м	Вертикальные сдвиги ветра, $c^{-1} \cdot 10^{-2}$						Число случаев
			$\leq 1,0$	1,1 – 2,0	2,1 – 3,0	3,1 – 4,0	4,1 – 5,0	$> 5,0$	
Северное	За 6 ч до появления низких облаков	0 – 180	6	28	28	27	8	3	67
		180 – 500	39	50	9	2	–	–	
	В период существования низких облаков	0 – 180	9	28	29	19	9	6	176
		180 – 500	31	54	13	2	–	–	
	В дни без низких облаков	0 – 180	14	47	26	10	3	–	101
		180 – 500	52	42	6	–	–	–	
Южное	За 6 ч до появления низких облаков	0 – 180	13	53	18	16	–	–	38
		180 – 500	55	32	10	3	–	–	
	В период существования низких облаков	0 – 180	4	32	33	19	10	2	95
		180 – 500	25	60	15	–	–	–	
	В дни без низких облаков	0 – 180	18	65	11	6	–	–	72
		180 – 500	56	42	2	–	–	–	

Анализ данных табл. 3 показывает, что и при адвекции холода, и при адвекции тепла во всех трех категориях случаев (за 6 ч до появления, в период существования низких облаков и при их отсутствии) имеются довольно существенные различия в преобладающих и возможных максимальных значениях сдвигов ветра в слоях 0 – 180 и 180 – 500 м. Так, в нижнем слое во всех категориях случаев наибольшую повторяемость составляют сдвиги от 1,1 до 4,0  $c^{-1} \cdot 10^{-2}$  (от 76 до 87 %) и в отдельных категориях наблюдаются (в 3 – 15 % случаев) сдвиги более 4,0  $c^{-1} \cdot 10^{-2}$ . В то же время в слое 180 – 500 м в 85 – 96 % случаев сдвиги ветра были в пределах 0,1 – 2,0  $c^{-1} \cdot 10^{-2}$  и практически не превышали 3,0  $c^{-1} \cdot 10^{-2}$ .

Таким образом, согласно распределению значений вертикальных сдвигов ветра, наиболее турбулентными во всех рассмотренных случаях являются нижние 180 м, а выше турбулентность ослабевает. Уменьшение турбулентности с высотой в соответствии с данными работ [1, 4, 8] способствует усилению восходящих вертикальных токов в пограничном слое атмосферы и ослаблению нисходящих. Таким образом, в условиях, благоприятных появлению облаков, указанное распределение рассмотренного показателя турбулентности является одним из облакообразующих факторов.

Был также проведен совместный анализ вертикальных сдвигов ветра с вертикальными градиентами температуры в трех градациях: нормальное распределение ( $\gamma > 0,4 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ м}$ ); замедленное падение температуры с высотой ( $0,4 \text{ }^\circ\text{C} \geq \gamma > 0 \text{ }^\circ\text{C}$ ); инверсия или изотермия ( $\gamma \leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Было обнаружено, что в случаях, предшествующих появлению низких облаков, и в периоды их существования при уменьшении градиентов температуры увеличивалась повторяемость больших сдвигов ветра.

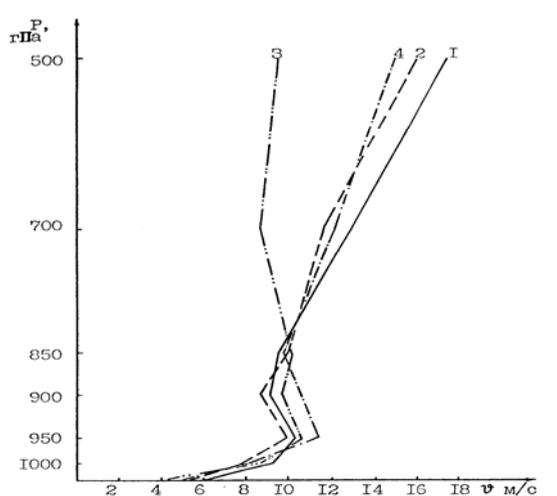


Рис. 1. Профили средних скоростей ветра при низкой облачности:  
 1 – зона холодных фронтов (основных и окклюзий);  
 2 – однородная воздушная масса при северном ветре;  
 3 – однородная воздушная масса при южном ветре;  
 4 – зона теплых фронтов (основных и окклюзий).

Представляло интерес определить высоту пограничного слоя атмосферы при облакообразовании в районе Баку. К.Г. Абрамович отмечает, что указанием высоты пограничного слоя атмосферы в дни с низкой облачностью может служить достаточно четко выраженный максимум в профиле скорости ветра на уровнях 600 – 900 м; в пределах этой высоты находится и слой активного турбулентного обмена, характеризующийся значениями  $Ri < 1$ . В связи с этим были построены профили средних скоростей ветра в Баку в периоды существования низкой облачности (рис. 1).

Можно видеть, что при всех процессах в нижнем слое атмосферы наблюдается значительное усиление ветра с высотой, причем максимум скорости располагается на уровне 500 м. Этот уровень можно считать средней высотой пограничного слоя атмосферы во всех ситуациях.

В заключение приведем рисунки 2 и 3, иллюстрирующие примеры изменения температуры и влажности при движении теплых и холодных воздушных масс над акваторией Каспийского моря, приведшие к появлению низкой облачности в Баку.

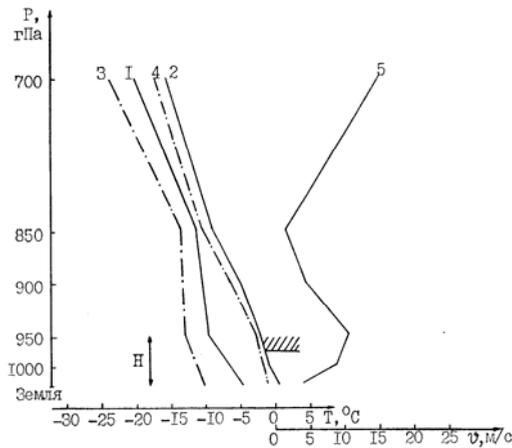


Рис. 2. Распределение метеорологических величин при адвекции холода.  
 1 – температура, 3 – точка росы по данным радиозондирования атмосферы в Махачкале за 21 ч 23 декабря 1977 г.;  
 2 – температура, 4 – точка росы, 5 – скорость ветра по данным радиозондирования атмосферы в Баку за 03 ч 24 декабря 1977 г.;  
 H – высота пограничного слоя атмосферы.

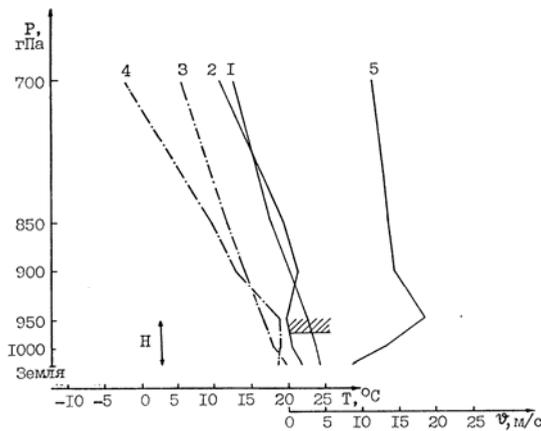


Рис. 3. Распределение метеорологических величин при адвекции тепла.  
 1 – температурф, 3 – точка росы по данным радиозондирования атмосферы в Ленкорани за 21 ч 13 мая 1978 г.;  
 2 – температура, 4 – точка росы, 5 – скорость ветра по данным радиозондирования атмосферы в Баку за 03 ч 14 мая 1978 г.;  
 H – высота пограничного слоя атмосферы.

На рис. 2 дано распределение по высоте температуры и точки росы в Махачкале в 21 ч 23 декабря 1977 г. и последующие через 6 ч в 3 ч 24 декабря распределение этих же величин в Баку: здесь к этому времени появилась низкая облачность высотой  $\leq 300$  м, продержавшаяся до 18 ч. При этом до высоты

1000 м наблюдался северный ветер с максимумом скорости на уровне 500 м. Можно видеть, что в результате перемещения холодного воздуха над теплой поверхностью Каспийского моря произошло значительное повышение температуры и особенно влажности в пограничном слое атмосферы, приведшее к образованию низких облаков. Причиной, способствующей этому процессу турбулентности, являются как термический, так и динамический факторы.

На рис. 3 показан случай адвекции тепла из района Ленкорани. Распределение температуры и точки росы в этом пункте за 6 ч до появления низких облаков в Баку представлено кривыми 1 и 3. Облачность появилась в Баку в 3 ч 14 мая 1978 г. и сохранялась до 9 ч этого же дня. Можно видеть, что в процессе перемещения воздуха к северу, над относительной холодной водной поверхностью, в пограничном слое атмосферы произошло понижение температуры и повышение температуры точки росы. В результате к моменту появления низкой облачности в районе Баку образовалась инверсия температуры, нижняя граница которой совпадает с максимумом скорости ветра и высотой слоя активного турбулентного обмена на уровне 500 м. Выше этого уровня, как показали расчеты,  $Ri > 3$ . Можно предполагать, что верхняя граница низких облаков в данном случае также расположена на высоте 500 м.

### Литература

1. *Абрамович К.Г.* Характеристика турбулентности атмосферы в дни с низкой облачностью. // *Метеорология и гидрология*, 1958, № 9, с. 3–10.
2. *Абрамович К. Г.* Условия образования и прогноз низких облаков. // *Труды Гидрометцентра СССР*, 1973, вып. 78. – 124 с.
3. *Абрамович К.Г., Хргиан А.Х.* Исследование условий возникновения слоистообразной облачности нижнего яруса. // *Труды ЦАО*, 1960, вып. 28, с. 3–48.
4. *Арраго Л.Р., Швец М.Е.* К теории образования и эволюции не конвективной облачности. // *Труды ГГО*, 1961, вып. 121, с. 53–58.
5. *Буйнов М.В., Хворостьянов В.И.* Моделирование облаков и туманов в пограничном слое атмосферы. // *Обзор*. – Обнинск, 1982. – 67 с.
6. *Матвеев Л.Т.* Условия образования и эволюции облаков под влиянием вертикальных токов и турбулентного обмена. // *Изв. АН СССР. Сер. Геофиз.*, 1961, № 1, с. 130–140.
7. *Матвеев Л.Т.* Динамика облаков. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 311 с.
8. *Хворостьянов В.И.* Об обратных связях между турбулентностью, вертикальными токами и облачностью в пограничном слое атмосферы. // *Изв. АН СССР, ФАО*, 1979, т. 15, № 8, с. 804–811.