

УДК 551.554 (575.2) (04)

**ВЕРТИКАЛЬНЫЕ СДВИГИ ВЕТРА
В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ В АЭРОПОРТУ “МАНАС”**

О.А. Подрезов – докт. геогр. наук,
И.С. Брусенская – соискатель

Statistic and climatic data of vertical wind shear above Manas strip are considered. This research was made for the first time with using pilot-balloon data up to 900 m altitude for different seasons, day- and night-time.

Одной из важных характеристик пространственной изменчивости ветра, знание которой необходимо учитывать при пилотировании воздушных судов является вертикальный сдвиг ветра (ВСВ), который относится к опасным для авиации явлениям погоды [1]. Особенно важно знание ВСВ в приземном 30-метровом слое (10–40 м), где он влияет на взлет и посадку, а также в нижней части пограничного слоя (ПГС) атмосферы высотой до 500 (1000) м [1–9].

Численно ВСВ $\vec{\beta}$ есть вертикальный градиент вектора ветра \vec{V}

$$\vec{\beta} = \frac{\partial \vec{V}}{\partial Z}, \tag{1}$$

который имеет модуль β и направление γ , совпадающее с направлением $\partial \vec{V}$. Единицей измерения $\vec{\beta}$ и β является c^{-1} .

В практике метеорологического обслуживания авиации используется значение модуля β как характеристики ВСВ. По рекомендациям Международной организации гражданской авиации (ИКАО) приняты критерии опасности ВСВ β в приземном слое 10–40 м (табл. 1), которые рассчитываются в единицах c^{-1} (т.е. в м/с·м) и в 30 раз больших – м/(с·30 м) или узлах/100 фут.

Следует заметить, что значение β , определенное для одной и той же метеорологиче-

ской ситуации, уменьшается при увеличении слоя ΔZ , для которого оно рассчитано. Это объясняется нелинейным в общем случае изменением β с высотой в ПГС, где β , как правило, резко уменьшается по закону обратной экспоненты. Поэтому при анализе ВСВ надо обязательно указывать толщину слоя ΔZ , по которому рассчитано β , и высоту положения этого слоя.

Таблица 1

Шкала ИКАО категорий опасности вертикальных сдвигов ветра в слое 10–40 м

Качественный термин	c^{-1} (м/с на 1 м)	м/с на 30 м	Узлы на 100 фут
Слабый	0–0,07	0–2	0–4
Умеренный	0,07–0,14	2–4	5–8
Сильный	0,14–0,21	4–6	9–12
Очень сильный	> 0,21	> 6	> 12

Целью настоящей работы явилось статистико-климатическое исследование характеристик ВСВ над взлетно-посадочной полосой (ВПП) аэропорта “Манас” до высот 700–900 м, поскольку также данные до настоящего времени отсутствовали, хотя они крайне важны в оперативной работе аэроцентра Манас.

Для решения задачи использованы анемометрические (мачта 10 м, диспетчерская вышка 30 м) и шаропилотные измерения ветра до

высот 900 м, которые в течение 11 лет (1981–1991 гг.) проводились авиаметцентром Манас. Всего было использовано 11187 ветровых зондирований за 5 лет (1984, 1987, 1988, 1990 и 1991 гг.), когда шаропилоты выпускали ежедневно от 3 до 8 раз в сутки. Значения β (c^{-1}) рассчитывали для слоев 10–30, 10–40, 40–100, 100–200 ..., 700–900 м. При этом на 10 и 30 м использовали измерения ветра по анемометрам типа М–47, а на остальных высотах – по шаропилоту. Все расчеты вели аналитически по специально разработанной схеме с использованием программы Excel путем разложения каждого измеренного значения вектора ветра \vec{V} на составляющие V_x и V_y по осям координат x и y , которые направлялись соответственно с запада на восток и с юга на север.

Все полученные данные β дифференцировали для каждого высотного слоя на выборки по 4 сезонам года и 4 временам суток – утро, день, вечер и ночь. При этом, объем сезонных выборок n составлял 1973–6659 зондирований, а объем выборок для различных частей суток по сезонам – от 259–1662 случаев, что свидетельствует о надежности полученных результатов и выводов. Для каждой эмпирической выборки рассчитывали основные статистики распределений β : среднее значение – $\bar{\beta}$; среднее квадратическое отклонение (СКО) – $\sigma(\beta)$; коэффициенты вариации – $C(\beta)$, асимметрии – $A(\beta)$ и эксцесса – $E(\beta)$. Кроме того, определяли β_m – абсолютные

максимальные по выборке значения и $\bar{\beta}_m$ – средние из годовых максимумов β .

1. ВСВ в приземном слое 10–40 м.

В табл. 2 приведены рассчитанные таким образом по каждому сезону и времени суток значения $\bar{\beta}$, $C(\beta)$, β_m и $\bar{\beta}_m$ для приземного слоя 10–40 м. Кроме того, в табл. 3 даны отношения k величин $\bar{\beta}$ (10–30 м) и $\bar{\beta}$ (10–40 м) – среднее значение \bar{k} и пределы k , что необходимо для сравнения средних ВСВ, полученных в приземных слоях 10–30 и 10–40 м.

Оказалось, что во все сезоны года и время суток распределения β имеют большую правую асимметрию ($A(\beta) > 0,8–0,9$), островершинность ($E(\beta) > 0,8–0,9$) и не могут быть описаны нормальным законом. Одновременно с этим изменчивость β относительно своих средних значений $\bar{\beta}$ также велика. Как видно из табл. 2, коэффициент вариации $C(\beta) = 0,68 \dots, 1,01$. Это свидетельствует о том, что функция плотности вероятностей $f(\beta)$ имеет длинную правую ветвь, сначала резко спадающую с оси x , а затем медленно сближающуюся с ней. В результате, в отдельных случаях индивидуальные β_i могут существенно превышать средние значения $\bar{\beta}$.

Как видно из табл. 2, во все сезоны и время суток, средние сдвиги ветра $\bar{\beta}$ находятся вблизи границы перехода от слабого к умеренному ВСВ ($\bar{\beta} = 0,052 \dots, 0,081$). Ввиду ма-

Таблица 2

Статистические характеристики ВСВ для слоя 10–40 м

Время суток	Параметры ВСВ				Время суток	Параметры ВСВ			
	$\bar{\beta}, c^{-1}$	$C(\beta)$	$\bar{\beta}_m, c^{-1}$	β_m, c^{-1}		$\bar{\beta}, c^{-1}$	$C(\beta)$	$\bar{\beta}_m, c^{-1}$	β_m, c^{-1}
Зима (n = 1972)					Лето (n = 3359)				
Утро	0,069	0,68	0,23	0,34	Утро	0,067	0,68	0,24	0,30
День	0,052	0,79	0,21	0,27	День	0,067	0,68	0,28	0,31
Вечер	0,052	0,80	0,21	0,24	Вечер	0,070	0,74	0,30	0,34
Ночь	0,055	0,73	0,21	0,25	Ночь	0,071	0,65	0,26	0,29
Весна (n = 2716)					Осень (n = 2993)				
Утро	0,060	0,78	0,22	0,28	Утро	0,078	1,01	0,37	0,43
День	0,081	0,77	0,30	0,38	День	0,059	0,95	0,24	0,32
Вечер	0,076	0,78	0,26	0,32	Вечер	0,056	0,90	0,19	0,26
Ночь	0,060	0,73	0,21	0,26	Ночь	0,054	0,99	0,26	0,30

Таблица 3

Средние значения $\bar{k} = \bar{\beta}(10-30)/\bar{\beta}(10-40)$ и его пределы по сезонам и времени суток

Сезон	\bar{k}	Пределы k	Время суток	\bar{k}	Пределы k
Зима	1,49	1,44–1,56	Утро	1,48	1,34–1,70
Весна	1,27	0,93–1,70	День	1,39	0,93–1,64
Лето	1,47	1,34–1,64	Вечер	1,46	1,00–1,96
Осень	1,64	1,37–1,96	Ночь	1,53	1,43–1,69

лого диапазона разброса $\bar{\beta}$ по сезонам и времени суток можно утверждать, что существенно от этих факторов $\bar{\beta}$ не зависит. Следует лишь отметить тенденцию некоторого увеличения $\bar{\beta}$ зимой и осенью в утреннее время, весной в дневное и вечернее, летом в вечернее и ночное.

Однако то, что средние значения $\bar{\beta}$ в слое 10–40 м близки слева и справа к нижней границе градации умеренного сдвига – несколько неожиданный результат, учитывая слабые средние скорости ветра в районе ВПП Манас. Видимо, заметную роль в увеличении ВСВ имеет векторный сдвиг, который формируется одновременно под действием изменения и модуля, направления ветра.

Максимальные сдвиги ветра в отдельных случаях могут быть существенно выше средних. Так, средние из годовых максимумов $\bar{\beta}_m$ ($\bar{\beta}_m = 0,21-0,37 \text{ с}^{-1}$) в 3–5 раз больше $\bar{\beta}$. Они во всех случаях попадают в градацию очень сильного ВСВ. Еще большие значения имеют абсолютные максимумы, равные $\beta_m = 0,24 \dots, 0,43 \text{ с}^{-1}$.

Полученные выводы в целом хорошо согласуются с имеющимися по ВСВ [2–8]. Так, по наблюдениям на высотной метеорологической мачте в Обнинске [5–7] лишь около 3% ВСВ попадают в градацию сильных и очень сильных, тогда как 80% – в градацию слабых. Но именно редкие сильные и очень сильные сдвиги создают предпосылки летных происшествий или обуславливают целый ряд таких происшествий [9].

Рассмотренные сдвиги ветра определяли по измерениям анемометров на высоте 10 м (мачта) и ветром на “середине первого слоя” – 40 м по шару-пилоту. Рассчитанные сдвиги ветра для слоя 10–30 м (анемометр-анемометр)

оказались в среднем в 1,5 раза выше (табл. 3).

При этом диапазон \bar{k} по сезонам года составил 1,27 ..., 1,64, а по времени суток – 1,39 ..., 1,53.

Такие расхождения могут объясняться следующими причинами: 1) влиянием различных методик измерений ветра с усреднением по времени (анемометр) и по слою (шар-пилот); 2) значительной удаленностью мачты (10 м) и диспетчерской вышки (30 м) – около 2 км, т.е. разнесенностью измерений по горизонтали с возможным влиянием зданий аэропорта и самой вышки на показания анемометра; 3) увеличением β за счет меньшей толщины слоя 10–30 м, равной 20 м; 4) реальными особенностями режима сдвига в районе ВПП Манас.

Наиболее просто было попытаться исключить причину 3. Используя данные работы [7], рассчитанные значения $\bar{\beta}$ для слоя 10–30 м были “приведены” к слою 10–40 м. Однако поправка оказалась малой, всего – 0,01 (-0,02) с^{-1} , что не дало заметного результата. Но возможно, что зависимости работы [7] непоказательны для условий Манаса. Влияние различных методик измерений ветра, по-видимому, не оказалось существенным. Это показано в работе [10, 11]. Остается признать значимой либо причину 2 – искажение результатов измерений за счет значительной удаленности анемометров, влияние диспетчерской вышки и других сооружений – либо все же это реальное отражение специфики режима сдвига ветра в нижнем приземном слое района ВПП Манаса. Скорее всего, это наложение и того, и другого. Ответить на этот вопрос можно только путем организации специальных измерений ветра.

2. Высотный профиль ВСВ в пограничном слое 100–900 м. Все характеристики ВСВ были рассчитаны также по слоям 40–100, 100–200, 200–300 ..., 700–900 м для различных се-

зонов года и времени суток. Оказалось, что качественный характер статистических распределений β для них такой же, как и в приземном слое 10–40 м: распределения сильно правоасимметричны ($A(\beta) > 1,0$), существенно островершинны ($E(\beta) > 1,3$) и не подчиняются нормальному закону. Изменчивость отдельных значений β_i около своих средних $\bar{\beta}$ высока – $C(\beta) = 0,7–1,3$. Все это свидетельство того, что максимальные значения β_m могут превышать средние значения в несколько раз.

Оценка высотных профилей ВСВ в различные сезоны и время суток особенно актуальна, и применена нами для диапазона высот 10–800 м, т.е. с использованием данных и приземного слоя 10–40 м (см. рисунок). В табл. 4 приведены средние значения $\bar{\beta}$ и средние из годовых максимумов $\bar{\beta}_m$ для слоев 40–100 и 400–500 м. В совокупности эти сведения дают полную картину, характеризую высотные профили ВСВ.

Прежде всего, в вертикальном ходе ВСВ независимо от сезона и времени суток совершенно четко можно выделить две высотные

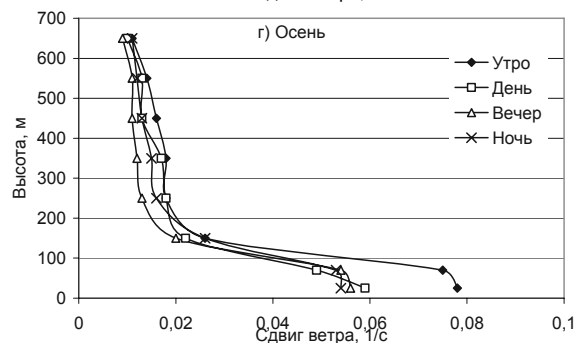
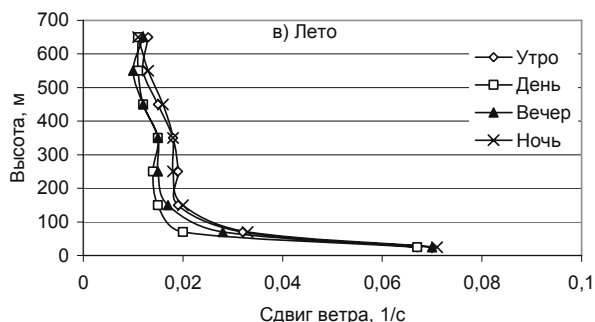
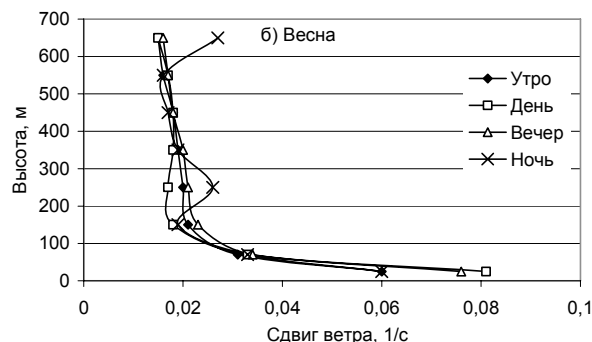
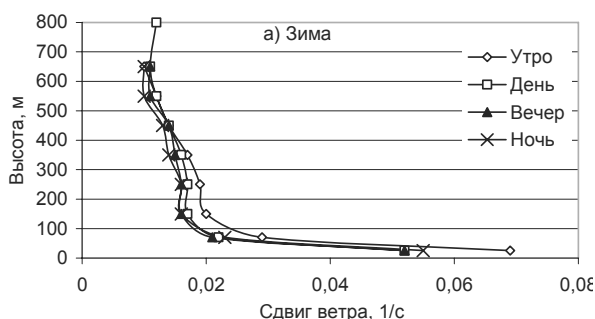
области с резко различной скоростью уменьшения β с высотой:

- 1) слой 10–100 м, где средние значения β очень быстро уменьшаются с высотой;
- 2) слой 100–700 (900) м, где средние значения β мало меняются с высотой (слабое уменьшение или колебания значений, но все это в пределах очень слабого сдвига).

Более детальные особенности высотных профилей ВСВ сводятся к следующему.

Зима. Средние значения ВСВ резко убывают от слоя 10–40 м к слою 100–200 м в пределах от $\beta = 0,052–0,069$ до $0,016–0,021 \text{ с}^{-1}$, т.е. округленно в 3 раза. Выше слоя 100–200 м $\bar{\beta}$ слабо убывает от $0,019$ до $0,010 \text{ с}^{-1}$ в слое 600–700 м. Коэффициент вариации не зависит от высоты и колеблется в диапазоне $0,68–1,08$.

Максимальные значения ВСВ убывают качественно по такому же закону: $\bar{\beta}_m = 0,21–0,23 \text{ с}^{-1}$ (10–40 м) и $\bar{\beta}_m = 0,06–0,07 \text{ с}^{-1}$ (100–200 м); $\beta_m = 0,24–0,34 \text{ с}^{-1}$ (10–40 м) и $\beta_m = 0,07–0,09 \text{ с}^{-1}$ (100–200 м). Выше, к слою 600–700 м, $\bar{\beta}_m$ убывают до $0,04–0,05 \text{ с}^{-1}$, а β_m – до $0,05–0,08 \text{ с}^{-1}$.



Зависимость ВСВ от высоты в слое 10–900 м (высоты ВСВ соответствуют серединам слоев).

Таблица 4

Значения $\bar{\beta}$ (с⁻¹) и $\bar{\beta}_m$ (с⁻¹) в слоях 40–100 и 400–500 м.

Время суток	40–100 м		400–500 м		Время суток	40–100 м		400–500 м	
	$\bar{\beta}$, с ⁻¹	$\bar{\beta}_m$, с ⁻¹	$\bar{\beta}$, с ⁻¹	$\bar{\beta}_m$, с ⁻¹		$\bar{\beta}$, с ⁻¹	$\bar{\beta}_m$, с ⁻¹	$\bar{\beta}$, с ⁻¹	$\bar{\beta}_m$, с ⁻¹
Зима					Лето				
Утро	0,029	0,10	0,014	0,06	Утро	0,032	0,07	0,015	0,06
День	0,022	0,10	0,014	0,07	День	0,020	0,08	0,012	0,10
Вечер	0,021	0,09	0,014	0,05	Вечер	0,028	0,10	0,012	0,04
Ночь	0,023	0,10	0,013	0,08	Ночь	0,033	0,10	0,016	0,12
Весна					Осень				
Утро	0,031	0,11	0,018	0,07	Утро	0,075	0,10	0,016	0,07
День	0,033	0,13	0,018	0,08	День	0,049	0,11	0,013	0,06
Вечер	0,034	0,10	0,018	0,05	Вечер	0,054	0,08	0,011	0,04
Ночь	0,033	0,10	0,017	0,07	Ночь	0,053	0,13	0,013	0,06

Весна. Значения $\bar{\beta}$ убывают, как и зимой, примерно в 3 раза от слоя 10–40 м к слою 100–200 м и характеризуются соответственно пределами: $\bar{\beta} = 0,060–0,081$ с⁻¹ и $\bar{\beta} = 0,018–0,023$ с⁻¹. Выше, к слою 600–700 м, $\bar{\beta}$ слабо убывает до значений 0,015–0,016 с⁻¹. Коэффициент вариации не зависит от высоты, колеблясь в диапазоне 0,71–0,93.

Максимальные значения β убывают с высотой по такой же закономерности: $\bar{\beta}_m = 0,21–0,30$ с⁻¹ (10–40 м) и $\bar{\beta}_m = 0,07–0,09$ с⁻¹ (100–200 м); $\beta_m = 0,26–0,38$ с⁻¹ (10–40 м) и $\beta_m = 0,08–0,13$ с⁻¹ (100–200 м). Выше к уровню 600–700 м, $\bar{\beta}_m$ убывает до 0,04–0,06 с⁻¹, а β_m – до 0,06–0,14 с⁻¹.

Лето. Средние значения также остаются прежними: $\bar{\beta} = 0,07$ с⁻¹ в слое 10–40 м, убывая примерно в 3–4 раза к слою 100–200 м, где $\bar{\beta} = 0,015–0,020$ с⁻¹. К слою 600–700 м $\bar{\beta}$ медленно убывает до 0,011–0,013 с⁻¹. Коэффициент вариации не зависит от высоты и находится в пределах 0,68–1,25.

Однако максимальные значения β относительно малы и медленнее убывают с высотой: $\bar{\beta}_m = 0,10–0,13$ с⁻¹ (10–40 м) и $\bar{\beta}_m = 0,06–0,12$ с⁻¹ (100–200 м); $\beta_m = 0,11–0,16$ с⁻¹ (10–40 м) и $\beta_m = 0,07–0,16$ с⁻¹ (100–200 м). Выше к слою 600–700 м $\bar{\beta}_m$ уменьшается до 0,05–0,08 с⁻¹, а β_m – до 0,06–0,10 с⁻¹.

Осень. Как и во все другие сезоны, от слоя 10–40 м, где $\bar{\beta} = 0,054–0,078$ с⁻¹, средние значения убывают к слою 100–200 м примерно в 3 раза, находясь в диапазоне 0,020–0,026 с⁻¹. К слою 600–700 м $\bar{\beta}$ медленно убывает до 0,010–0,011 с⁻¹. Коэффициент вариации не зависит от высоты, составляя 0,77–1,20.

Максимальные значения ВСВ, как и летом, оставаясь относительно низкими, мало понижаются с высотой: $\bar{\beta}_m = 0,08–0,13$ с⁻¹ (10–40 м) и $\bar{\beta}_m = 0,05–0,08$ с⁻¹ (100–200 м); $\beta_m = 0,11–0,18$ с⁻¹ (10–40 м) и $\beta_m = 0,06–0,13$ с⁻¹ (100–200 м). К высоте 600–700 м $\bar{\beta}_m$ уменьшается до 0,03–0,05 с⁻¹, а β_m – до 0,05–0,08 с⁻¹.

Таким образом, климато-статистический режим вертикальных сдвигов ветра в слое до 900 м в аэропорту “Манас” различен:

1. В приземном слое 10–40 м средние ВСВ во все сезоны года и время суток находятся в пределах 0,06–0,10 с⁻¹, что соответствует границе перехода от слабых к умеренным сдвигам по шкале ИКАО.
2. Изменчивость ВСВ в слое 10–40 м велика ($C(\beta) = 0,7–1,0$), а их статистические распределения сильно правоасимметричны и островершинны.
3. Максимальные сдвиги ветра в слое 10–40 м в любой из сезонов года и время суток могут достигать более 0,21 с⁻¹, что соответствует очень сильным сдвигам ветра по шкале ИКАО.

4. Высотные профили средних ВСВ во все сезоны и время суток характеризуются их резким убыванием (примерно в 3 раза) от слоя 10–40 м к слою 100–200 м, а затем очень медленным уменьшением к слою 700–900 м в пределах градации очень слабых сдвигов. Максимальные сдвиги зимой и весной также очень быстро уменьшаются с высотой (примерно в 3 раза к слою 100–200 м). Однако летом и осенью это уменьшение мало, возможно по причине более низких значений сдвигов в слое 10–40 м.
5. Желательно провести специальные ветровые наблюдения по возможности уточнению ВСВ в приземном слое 10–40 м на основе анемометрических данных.

Литература

1. *Богаткин О.Г.* Авиационная метеорология. – СПб: Издательство государственного гидрометеорологического университета, 2005. – 328 с.
2. *Брюхань Ф.Ф., Гушерман И.Г.* Климатическая характеристика вертикальных сдвигов ветра в приземном слое атмосферы над СССР // Метеорология и гидрология. – №5. – Л.: Гидрометеоздат, 1981. – С. 17–23.
3. *Бызова Н.Л., Велковицкая З.И.* Статистические характеристики мгновенных сдвигов ветра в нижнем слое атмосферы // Метеорология и гидрология. – №12. – 1980. – С. 31–38.
4. *Васильев А.А.* Сдвиг ветра в нижнем слое в зоне атмосферных фронтов // Труды Гидрометецентра СССР. – Вып. 215. – Л.: Гидрометеоздат, 1979. – С. 79–82.
5. *Глазунов В.Г.* Вертикальный сдвиг ветра в приземном слое атмосферы при различном периоде осреднения данных изменений ветра // Труды Гидрометцентра СССР. – Вып. 215. – Л.: Гидрометеоздат, 1979. – С. 83–96.
6. *Глазунов В.Г., Кабанов А.В.* Вертикальные сдвиги ветра в слое приземной инверсии температуры // Труды Гидрометцентра СССР. – Вып. 247. – Л.: Гидрометеоздат, 1982. – С. 79–90.
7. *Глазунов В.Г.* Величина вертикального сдвига ветра при различной толщине слоя в приземной части атмосферы // Труды Гидрометцентра СССР. – Вып. 70. – Л.: Гидрометеоздат, 1970. – С. 45–57.
8. *Исамухомедова У.* Сильные вертикальные сдвиги ветра в зоне взлета и посадки самолетов в аэропортах Узбекистана // Труды САНИГМИ. – 1966. – Вып. 25(40). – С. 74–82.
9. Сдвиг ветра. Циркуляр ИКАО 186-AN/122. – Международная организация гражданской авиации. – Монреаль (Канада), 1987. – 200 с.
10. *Брусенская И.С.* Аэроклиматическая характеристика режима ветра в пограничном слое атмосферы в районе аэропорта “Манас” // Настоящий выпуск. – С. 114–115.
11. *Брусенская И.С.* Режим средних скоростей ветра в днищах Чуйской, Таласской и Чон-Кеминской долин // Погода и климат Кыргызстана. – Вып. 2. – 2005. – С. 15–29.