

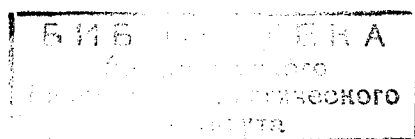
551v5
п 92

ЦЕНТРАЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ ПРОГНОЗОВ

И. Г. ПЧЕЛКО

АЭРОСИНОПТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ
БОЛТАНКИ САМОЛЕТОВ
В ВЕРХНИХ СЛОЯХ ТРОПОСФЕРЫ
И НИЖНЕЙ СТРАТОСФЕРЕ

170352



ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО (ОТДЕЛЕНИЕ)

Москва — 1962

АННОТАЦИЯ

Исследование, выполненное на основе анализа большого фактического материала, позволило значительно дополнить и уточнить ранее существовавшие представления об аэросиноптических условиях возникновения болтанки самолетов в верхних слоях тропосферы и нижней стратосфере. Показано, что эти условия создаются главным образом в областях значительных изменений горизонтальных градиентов геопотенциала (температуры), т. е. в тех частях струйных течений, где образуются горизонтальные сдвиги ветра — боковые и вдоль потока. Обращается особое внимание на сдвиги ветра по потоку, связанные с дивергенцией воздушных течений в дельте высотной фронтальной зоны. Дается критический анализ применения критерия Ричардсона для диагноза и прогноза турбулентности и указывается, что более целесообразно применять этот критерий с учетом характера его изменений с высотой.

Книга рассчитана на широкий круг синоптиков и летчиков.

ПРЕДИСЛОВИЕ

К числу метеорологических явлений, имеющих большое значение для современной турбореактивной авиации, относится турбулентность в верхней тропосфере и нижней стратосфере, вызывающая болтанку самолетов. Достаточно вспомнить о гибели из-за исключительно сильной турбулентности на больших высотах двух английских самолетов типа «Каравела» в апреле 1954 г. над Средиземным морем, чтобы понять всю значимость этого явления для метеорологов, обслуживающих авиацию. Но подобные случаи болтанки, к счастью, очень редки. Несмотря на это, проблема турбулентности приобретает все большее значение как с точки зрения удобства пассажиров, так и в отношении эксплуатации турбореактивных самолетов. Известны случаи, когда вследствие ускорений, вызываемых турбулентностью, пассажиры выбрасывались из сидений под потолок и получали легкие ранения. Такие явления вместе с неприятными физиологическими ощущениями, испытываемыми пассажирами, крайне нежелательны для воздушного транспорта. Повышенные же нагрузки, которым подвергаются во время болтанки различные детали самолета, в частности заклепки несущих плоскостей, подшипники приводных устройств и др., вызывают так называемую «усталость» металла и тем самым могут привести к преждевременной поломке этих деталей.

За последние 8—10 лет как в СССР, так и за границей было выполнено довольно большое количество исследований, посвященных данной проблеме. Например, в недавно вышедшей монографии Эльмара Рейтера по вопросу турбулентности на больших высотах [28] список литературы содержит 229 наименований, из которых 188 работ выполнено с 1950 г.

Выполненные исследования внесли много нового в наши представления о структуре турбулентности, ее влиянии на поведение самолета, а также о метеорологических условиях, определяющих возникновение турбулентности, опасной для самолета. Установлено при этом, что сильная болтанка на больших высотах нередко наблюдается при совершенно ясном небе. Соответствующие положения представляют для летчика особую опасность из-за своей неожиданности, поскольку перед этим он не замечает никаких внешних признаков болтанки.

Имеется уже и ряд методических указаний к диагнозу и прогнозу атмосферной турбулентности, как, например, указания, разработанные И. А. Клеминым и Н. З. Пинусом, Н. В. Петренко, Г. Д. Решетовым, С. М. Шметером, Н. И. Давыдовым и др. [12, 13, 14, 15]. Несмотря на это, наши возможности прогноза болтанки остаются пока весьма ограниченными. Вследствие большой трудности теоретического анализа рассматриваемого явления, а также недостаточности по количеству и качеству эмпирического материала, полученные различными авторами выводы еще не вполне отражают истинные причины возникновения турбулентности на больших высотах, а поэтому они и недостаточно эффективны.

В 1959—60 гг. в научных учреждениях ГУГМС, а также других ведомств предприняты новые исследования по изучению турбулентности атмосферы. В числе их были темы, посвященные изучению аэросиноптических условий болтанки самолетов в верхней половине тропосферы и нижней стратосфере. Одно из таких исследований выполнялось в Центральном институте прогнозов (ЦИП), сущность этой работы и изложена в настоящей книге. В ее содержание входят некоторые статистические данные, а также результаты изучения термодинамических и аэросиноптических условий, при которых возможна болтанка самолетов в верхних слоях тропосферы и нижних слоях стратосферы. Эти условия рассматриваются главным образом применительно к полетам по трассе Москва—Иркутск. Для лучшей иллюстрации отдельных диагностических и прогностических положений рассматриваются полеты и по другим трассам.

Предварительные результаты этой работы были опубликованы [18] и доложены на Всесоюзной конференции по авиационной метеорологии в июне 1960 г. По завершении работы она докладывалась в январе 1961 г. на Ученом совете ЦИПа. Основные из высказанных при обсуждении критических замечаний заключались в недостаточности для обоснования прогностических выводов тех статистических данных, которые относились к зависимости болтанки от различных форм высотного барического поля. Эти замечания были учтены, для чего был проведен дополнительный анализ материала и составлен ряд новых таблиц, в частности, характеризующих связь болтанки с конвергенцией и дивергенцией высотных воздушных течений, а также с горизонтальными сдвигами ветра.

В процессе исследования были обработаны и проанализированы следующие виды материала:

- 1) возвращенные бланки АВ-5 с записями летчиков о болтанке самолетов ТУ-104 по трассе Москва—Иркутск за период с декабря 1958 г. по ноябрь 1959 г. Всего было обработано 229 полетов с болтанкой и 848 полетов без болтанки;

- 2) протоколы полетов синоптиков ЦИПа, совершавших полеты на ТУ-104 по трассе Москва—Иркутск—Хабаровск в период с октября 1959 г. по август 1960 г. Таких протоколов оказалось 172.

Частично обработан также аналогичный материал по трассе Москва—Ленинград;

3) Данные вертикального зондирования атмосферы, производившегося на самолете ИЛ-28 в районе Москвы за период с января по октябрь 1960 г. (всего 75 полетов). В дальнейшем будем называть этот вид материала специальным зондированием;

4) сообщения о болтанке реактивных самолетов, совершавших зондирование атмосферы в целях разведки погоды в различных пунктах территории СССР, в том числе и в районе Москвы. В отличие от предыдущего, данный вид материала будем называть оперативным зондированием. Таких полетов оказалось 60;

5) данные специальных экспериментальных полетов самолетов ТУ-104 и ИЛ-18, проводившихся с целью изучения турбулентности в струйных течениях в течение августа 1959 г. и мая 1960 г. над территорией Дальнего Востока.

Как видим, материал был весьма разнородным, что имело свои положительные и отрицательные стороны. В самом деле, нельзя было провести достаточно полное исследование вопроса, например, на материале лишь вертикального самолетного зондирования атмосферы, так как соответствующие данные в силу ограниченности района полета и очень небольшой его протяженности не могут отразить того многообразия условий возникновения болтанки, которые в действительности встречаются при полетах по трассам. Материал же, полученный от летчиков, а также от синоптиков, охватывает самые различные типы синоптических процессов, поскольку в каждом полете, в течение короткого промежутка времени, покрываются огромные площади, находящиеся под влиянием самых разнообразных атмосферных условий. Этот материал, таким образом, более полно отражает реальные условия образования зон болтанки в их взаимосвязи с различными метеорологическими элементами и явлениями погоды. Анализируя случаи болтанки на каких-либо участках трассы и сопоставляя соответствующие процессы с процессами, при которых болтанка отсутствовала, можно было с большей уверенностью выявить условия, наиболее благоприятные для возникновения опасной турбулентности. Данные же вертикального зондирования атмосферы и экспериментальных полетов позволили выяснить особенности вертикального строения атмосферы, что не всегда можно было сделать при использовании рейсовых полетов. Во всем этом заключается положительная роль разнородности использованного материала.

Отрицательная роль разнородности вытекает из неполноценности каждого вида материала в отдельности в смысле полноты и качества наблюдений, неоднородности их по времени, ограниченности по высоте¹ и большой субъективности в оценке интенсивности болтанки. Отсюда вытекали большие трудности в обобще-

¹ Полеты по трассам совершались на определенных эшелонах, т. е. преимущественно на высотах 8—9 км.

нии материала для получения более или менее определенных выводов. Ко всему этому существенные недостатки имеют и данные сетевого зондирования атмосферы (ошибки в значениях геопотенциала, температуры и ветра и недостаточная регулярность подъемов), что не способствовало объективному выяснению физической сущности процессов для случаев с болтанкой и без болтанки.

Методика обработки материала заключалась прежде всего в тщательном аэросиноптическом анализе каждого случая болтанки. Для всех данных вертикального зондирования атмосферы, а также для ряда случаев рейсовых полетов составлялись аэрологические диаграммы, по которым определялось расположение зон болтанки в зависимости от состояния общей и послойной стратификации атмосферы и вертикального распределения ветра. Большое внимание было уделено вопросу выяснения зависимости между болтанкой и критерием Ричардсона. Придавалось большое значение статистической обработке материала, которая проводилась, во-первых, с целью выяснения общих закономерностей условий, вызывающих болтанку самолетов в верхних слоях тропосферы и нижней стратосферы, и, во-вторых, в целях выбора наиболее правильного пути исследования.

В данном исследовании принимали участие мл. научный сотрудник ЦИПа Г. В. Васильева и инженер Ю. К. Федоров. Васильева выполнила первичную статистическую обработку и аэросиноптический анализ материала, полученного по наблюдениям летчиков. Кроме того, она проанализировала случаи экспериментальных полетов на Дальнем Востоке, которые производились с ее участием Центральной аэрологической обсерваторией (ЦАО) и Государственным научно-исследовательским институтом Гражданского воздушного флота (ГосНИИ ГВФ) в мае 1960 г. Федоров выполнил общую статистическую обработку протокольного материала полетов синоптиков по трассе Москва — Иркутск, а также произвел выборку и обработку данных радиозондирования в районе Москвы в целях выяснения связи между болтанкой и критерием Ричардсона, а также расчеты вертикальных движений для ряда конкретных случаев. Большую работу выполнили ст. техники Д. И. Гордеев и Е. С. Шивогорнова по выборке и технической обработке аэрологических и синоптических данных.

В процессе выполнения работы автор имел возможность ознакомиться с рукописью обширной монографии проф. В. А. Джорджио «Струйные течения и некоторые вопросы современной аэросиноптики», в которой большое место отведено турбулентности на больших высотах. За предоставленную возможность ознакомления с рукописью и ряд ценных советов автор выражает проф. В. А. Джорджио глубокую благодарность.

Глава I

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБЩЕЙ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛА

Оперативное метеорологическое обеспечение полетов по трассе Москва—Хабаровск осуществляется обычно раздельно по участкам Москва—Омск, Омск—Иркутск и Иркутск—Хабаровск. По этим участкам составляются прогнозы с выдачей летчикам бюллетеней АВ-5. Таким образом, поступившие к нам материалы в виде бюллетеней АВ-5 с записями пилотов дают представление об условиях погоды по соответствующим участкам трассы. Каждый такой бюллетень будет в дальнейшем считаться нами за один случай полета. За один случай болтанки принималась хотя бы одна запись об этом явлении, наблюдавшемся в каком-либо районе данного участка. Поскольку в одном полете нередко было несколько таких записей, то случаев с болтанкой оказалось больше, чем случаев полета.

Таблица I

Распределение случаев полета с болтанкой (А) и без болтанки (Б) по трассе Москва—Иркутск за период с декабря 1958 г. по ноябрь 1959 г. и повторяемость болтанки в процентах (В)

Участок трассы	Зима (XI—II)			Весна (III—V)			Лето (VI—VIII)			Осень (IX—X)			Всего		
	А	Б	В	А	Б	В	А	Б	В	А	Б	В	А	Б	В
Москва - Омск	35	92	28	70	270	21	20	94	18	4	13	24	129	469	23
Омск—Иркутск	20	74	21	54	212	20	23	78	23	3	15	17	100	379	20
Всего	55	166	25	124	482	20	43	172	20	7	28	20	229	848	21

В табл. I дано распределение случаев полета с болтанкой и без болтанки по двум участкам трассы Москва—Омск и Омск—Иркутск (по сообщениям летчиков).

Из приведенных в табл. I данных видно, что количество использованного материала, поступившего от летчиков, распределяется

по сезонам крайне неравномерно. Наибольшее количество сообщений приходится на весну, наименьшее — на осень. Однако такое распределение, очевидно, не зависело от количества полетов в различные сезоны. Скорее всего оно объясняется нерегулярностью поступления этих сведений от летчиков. Тем не менее данные табл. 1 представляют определенный интерес. Они говорят, например, о том, что болтанка в верхней тропосфере в холодную часть года имеет почти одинаковую повторяемость по сравнению с теплой частью года, даже несколько превышает ее. Заметно и то, что на участке Москва—Омск болтанка встречается чаще, чем на участке Омск—Иркутск. Но летом она более вероятна на участке Омск—Иркутск. В среднем за год повторяемость болтанки составляет для участков Москва—Омск и Омск—Иркутск соответственно 23 и 20 %.

Аналогично этому при обработке протоколов полетов синоптиков по трассе Москва—Иркутск—Хабаровск за один случай полета было принято считать полет между двумя какими-либо пунктами по трассе, включивший взлет и посадку в этих пунктах. Таким образом, если самолет, летевший, например, из Москвы до Иркутска, произвел 2—3 посадки, то мы считали, что весь рейс состоит из 2—3 полетов. Так как в этих протоколах записи о болтанке были весьма подробными, то в целях упрощения пришлось сделать некоторое их обобщение. За один случай болтанки принималась хотя бы одна запись этого явления на каком-либо участке трассы. Причем если между двумя ближайшими записями промежуток времени был менее 10 минут (по расстоянию 120—150 км), то такая болтанка считалась за один случай.

Полеты синоптиков, результаты которых представлены в табл. 2, проводились также весьма неравномерно. Подавляющее большинство полетов приходится на холодную половину года. Судя по этим данным, повторяемость болтанки составляет в холодную половину года в среднем 83 %, в теплую 94 %. Такие существенные различия можно объяснить большой неоднородностью количества использованных случаев. В частности, по некоторым участкам трассы количество полетов в теплое полугодие сводилось к единичным случаям, давшим повторяемость болтанки по 100 %. Средняя годовая величина этой повторяемости составляет 86 %.

Таким образом, два вида наблюдений над турбулентностью дали резко отличные значения повторяемости этого явления: по сообщениям летчиков средняя повторяемость болтанки составляет 21 %, по сообщениям синоптиков — 86 %. Главной причиной такого несоответствия является субъективность в оценке турбулентности. Летчики обычно интересуются только такой турбулентностью, которая по своей интенсивности значительно затрудняет полет или может оказаться опасной. Как правило, болтанку, вызывающую перегрузки 0,2 g и меньше, летчики не отмечают. Синоптики же должны были на данном этапе исследования отмечать все случаи беспокойства полета, в том числе случаи очень слабой болтанки

Таблица 2

Распределение случаев полета с болтанкой (А) и без болтанки (Б) по трассе Москва — Иркутск — Хабаровск за период с октября 1959 г. по август 1960 г. и повторяемость болтанки в процентах (В)

Участок трассы	Холодное полугодие			Теплое полугодие			Всего		
	А	Б	В	А	Б	В	А	Б	В
Москва—Свердловск	18	6	75	20	0	100	38	6	86
Москва—Омск	30	6	83	18	1	95	48	7	87
Свердловск—Новосибирск	12	2	86	4	2	67	16	4	80
Омск—Иркутск	30	8	79	5	0	100	35	8	81
Новосибирск—Иркутск	10	2	83	1	0	100	11	2	87
Иркутск—Хабаровск	20	1	95	4	0	100	24	1	96
Всего	120	25	83	52	3	94	172	28	86

(легкая тряска, отдельные толчки, «рыскание» самолета). Это необходимо было в целях изучения общей структуры турбулентного состояния атмосферы с тем, чтобы на фоне общего состояния было бы легче выявить те случаи, которые могут оказаться наиболее опасными для полета.

При более строгом подсчете повторяемости болтанки нужно обязательно учитывать протяженность зоны, для которой производится подсчет. Чем протяженнее эта зона, тем вероятнее встретить на каком-то ее участке болтанку. В работе [17] было показано (по данным экспериментальных полетов по трассе Москва — Новосибирск), что вероятность болтанки на участках этой трассы протяженностью около 400 км составляет в среднем 35% (при полетах на высотах 10—11 км).

В табл. 3 приведены средние значения повторяемости болтанки по трассе Москва—Иркутск—Хабаровск по данным полетов синоптиков. Эти значения подсчитаны для участков, имеющих более или менее одинаковую протяженность, приблизительно 1000 км. Обращают на себя внимание сравнительно «спокойные» участки Омск—Новосибирск и Иркутск—Чита, для которых повторяемость болтанки составляет соответственно 43 и 54%. Наиболее «неспокойными» являются участки Чита—Сковородино (92%) и Сковородино—Хабаровск (100%).

В работе [17] обращалось внимание на то, что на участке Свердловск—Омск вероятность болтанки на высотах 10—11 км несколько больше, чем на участке Казань—Свердловск. Это увеличение объяснялось воздействием подветренных волн. В данном случае статистика не вполне подтверждает высказанное ранее предположение, — получилась обратная картина, т. е. на участке Казань—Свердловск вероятность болтанки оказалась выше, чем

Таблица 3

Повторяемость болтанки на различных участках трассы
Москва — Иркутск — Хабаровск (в числителе число случаев, в знаменателе ‰)

Москва—Казань	Казань—Свердловск	Свердловск—Омск	Омск—Новосибирск	Новосибирск—Красноярск	Красноярск—Иркутск	Иркутск—Чита	Чита—Сквородино	Сквородино—Хабаровск
$\frac{86}{78}$	$\frac{86}{86}$	$\frac{64}{75}$	$\frac{51}{43}$	$\frac{46}{85}$	$\frac{46}{78}$	$\frac{24}{54}$	$\frac{24}{92}$	$\frac{24}{100}$

на участке Свердловск — Омск. Но в этом различии, кроме влияния орографии, могли сказаться многие другие причины, как, например, малый ряд наблюдений, неодинаковые высоты полета в тех и других случаях и др. Нельзя не отметить, что на участке Омск—Новосибирск, судя по данным табл. 3, повторяемость болтанки резко снижается по сравнению с участком Свердловск—Омск (соответственно 43 и 75%). Это могло произойти именно из-за уменьшения воздействия на полет подветренных волн по мере удаления к востоку от Уральского хребта.

Таблица 4

Повторяемость (‰) болтанки на различных высотах во время взлета и посадки самолетов (сообщения синоптиков)

Полугодие	Градации высоты (км)					Число случаев болтанки	Число полетов	Градации высоты (км)					Число случаев болтанки	
	0,1—2,0	2,1—4,0	4,1—6,0	6,1—8,0	8,1—10			0,1—2,0	2,1—4,0	4,1—6,0	6,1—8,0	8,1—10		
	Взлет							Посадка						
Холодное	35	24	17	18	6	120	120	29	25	22	19	5	191	
Теплое	34	27	11	18	10	82	52	27	26	22	18	7	97	

Данные табл. 4 дают представление о том, как часто и на каких высотах в тропосфере встречается болтанка при взлете и посадке самолетов. Анализ приведенных данных приводит нас к следующим выводам.

1. При снижении для захода на посадку болтанка встречается более часто, чем при взлете, — факт, который подтверждается исследованиями и других авторов [23]. При этом следует заметить, что увеличение случаев болтанки во время снижения происходит обычно за счет увеличения случаев умеренной и сильной болтанки. Объяснить это увеличение метеорологическими условиями трудно. Очевидно, оно связано с необходимостью для летчика большего маневрирования при снижении, чем при подъеме. Возможно также, что оно происходит вследствие уменьшения веса самолета из-за расхода горючего за время полета от одного пункта до другого, в результате чего он при снижении легче подвергается болтанке.

2. Как при взлете, так и при посадке самолет попадает в болтанку наиболее часто в нижнем четырехкилометровом слое тропосферы, особенно в слое 0,1—2,0 км. Выше 4 км повторяемость болтанки заметно уменьшается. В слое 8—10 км повторяемость болтанки во все сезоны года значительно меньше, чем во всех ниже лежащих слоях.

Однако полученная в табл. 4 повторяемость болтанки в слое 8—10 км является слишком заниженной по сравнению с другими слоями по причинам, которые пока трудно объяснить. Мы произвели соответствующие подсчеты по данным 75 полетов специального зондирования в районе Москвы. Из 75 полетов в 43 отмечалась болтанка в одном или в нескольких слоях тропосферы.

В результате подсчетов были получены данные о повторяемости болтанки по отдельным слоям, приведенные в табл. 5. Как видим, наименьшая повторяемость болтанки приходится на слой 4,1—6,0 км; выше она увеличивается и в слое 8,1—10,0 км она такая же, как и в слое 2,1—4,0 км.

Таблица 5

Повторяемость (%) болтанки на различных высотах при взлете по данным специального зондирования (Москва)

Градации высоты (км)					Число случаев болтанки	Число полетов
0,1—2,0	2,1—4,0	4,1—6,0	6,1—8,0	8,1—10,0		
35	20	10	15	20	113	43

Все исследованные нами случаи болтанки по данным летчиков и синоптиков были разбиты по интенсивности на слабую, умеренную и сильную. Повторяемость каждой из этих градаций соответственно по каждому виду материала дана в табл. 6.

Оказалось, что, несмотря на субъективность оценки интенсивности болтанки, величины повторяемости каждой градации для

Повторяемость (%) различной интенсивности болтанки по сезонам при горизонтальном полете (8—9 км)

Сезон	Интенсивность болтанки			Число случаев болтанки	Число полетов
	слабая	умеренная	сильная		
По сообщениям летчиков					
Зима	82	14	4	76	55
Весна	74	24	2	177	124
Лето	65	31	4	55	43
Осень	70	27	3	14	7
Среднее	73	24	3	322	229
По сообщениям синоптиков					
Холодное полугодие	83	15	2	232	120
Теплое полугодие	89	8	3	115	52
Среднее	86	12	2	347	172

случаев, полученных различными способами, очень близки между собой. Для всех видов данных явно преобладает слабая болтанка. Сильная болтанка при полетах на высотах 8—9 км встречается в среднем всего лишь в 2—3% случаев.

Нельзя, однако, не отметить, что, судя по сообщениям летчиков (табл. 6), в теплую часть года повторяемость слабой болтанки несколько уменьшается за счет увеличения повторяемости умеренной болтанки. Очевидно, эти данные более правильно отражают реальные условия, чем данные второй части табл. 6 (сообщения синоптиков), согласно которым в теплую часть года повторяемость слабой болтанки больше, чем в холодное время года. В целом же разница весьма незначительна.

Сведения, приведенные в табл. 7, дают представление о том, в какой связи находятся условия болтанки с облаками. Для сравнения в этой же таблице приводятся соответствующие данные и для случаев без болтанки. Последние взяты из материала сообщений летчиков и притом только для таких положений, когда при полете пересекались те или иные фронты.

Результаты, полученные при обработке материалов летчиков и синоптиков, оказались не вполне сходными. По данным летчиков, болтанка в среднем чаще всего наблюдается при полете в облаках, тогда как по сообщениям синоптиков она значительно чаще встречается вне облаков. Это различие можно объяснить только тем, что если, как об этом говорилось выше, синоптики отмечают все случаи болтанки, то летчики обычно фиксируют случаи только до-

Таблица 7

Повторяемость (%) случаев болтанки и без болтанки в облаках и вне облаков

Сезон	С болтанкой			Без болтанки		
	в обла- ках	вне об- лаков	число случаев	в обла- ках	вне об- лаков	число случаев
По сообщениям летчиков						
Зима	40	60	76	34	66	60
Весна	43	57	177	45	55	150
Лето	69	31	55	34	60	40
Осень	72	28	14	55	45	25
Среднее	56	44	322	42	58	275
По сообщениям синоптиков						
Холодное полугодие	36	64	232	—	—	—
Теплое полугодие	34	66	115	—	—	—
Среднее	35	65	347	—	—	—

статочной ощутимой болтанки. Поэтому, если иметь в виду главным образом умеренную и сильную болтанку, то она все же несколько чаще встречается в облаках. Следовательно, более показательными в этом отношении являются данные, полученные от летчиков. Согласно этим данным, преобладание случаев с болтанкой в облаках приходится на теплое время года, когда образование облачности в верхней тропосфере более вероятно, чем в холодную половину года. Это обстоятельство имеет важное практическое значение, поскольку, наблюдая за облаками, летчик уже в известной мере может ориентироваться в степени опасности метеорологической обстановки для полета.

С другой стороны, данные правой части табл. 7 показывают, что случаи без болтанки почти в равной мере приходятся как на полеты в облаках, так и на полеты вне облаков. Таким образом, можно сказать, что статистическая связь между условиями, вызывающими болтанку самолетов в верхней тропосфере, и облаками на соответствующих высотах недостаточно определена. Всегда нужно иметь в виду, что существует большая вероятность возникновения болтанки и при отсутствии облаков на уровне полета, что представляет опасность вследствие неожиданности. При составлении прогнозов необходимо учитывать конкретные условия, которые в одних случаях могут вызвать болтанку в облаках, в других случаях обеспечивают в них спокойный полет.

Так как условия возникновения болтанки часто связываются с тропопаузой, то и в настоящей работе необходимо было определить, в чем же выражается эта связь.

Повторяемость (%) случаев болтанки в зависимости от высоты полета по отношению к нижней границе тропопаузы

Вид материала	Разность между высотами уровня полета и нижней границы тропопаузы					Выше тропопаузы		Число случаев болтанки	Число полетов
	0,1—1,0	1,1—2,0	2,1—3,0	3,1—4,0	4,1—5,0	<1,0	>1,0		
Полет синоптиков	35	29	17	5	2	10	2	269	113
Вертикальное зондирование .	30	33	15	5	2	10	5	149	112

В табл. 8 дана повторяемость случаев болтанки при различных расстояниях между высотой полета и высотой нижней границы тропопаузы. Вычисления производились только для тех полетов, когда имелись достаточно надежные данные. Поэтому в подсчет были включены сведения, полученные от синоптиков, а также при вертикальном зондировании атмосферы. За уровень болтанки принималась нижняя граница того слоя, в котором она отмечалась. Результаты подсчета, приведенные в табл. 8, сводятся в основном к следующему: 1) преобладающее число случаев болтанки (63—64%) приходится на уровни, расположенные ниже тропопаузы до 2,0 км; 2) болтанка в нижней стратосфере встречается относительно редко (12—15%).

Расположение зон болтанки в верхних слоях тропосферы часто связывается с положением уровня максимального ветра, поэтому интересно было выяснить, как статистически выражается эта связь. С этой целью из данных самолетного зондирования атмосферы было отобрано 60 случаев, когда отмечалась болтанка (независимо от интенсивности) при скорости ветра 100 км/час и более. По существу, эти случаи относились к струйным течениям. При обработке 60 отобранных случаев получилась следующая повторяемость различных высот уровня максимального ветра по отношению к нижней границе тропопаузы:

Расстояние до тропопаузы (км)	0,0—1,0	1,1—2,0	2,1—3,0	3,1—4,0
Повторяемость (%)	43	40	15	2

Почти всегда уровень максимального ветра располагается под тропопаузой. Случаи, когда максимальный ветер наблюдался над тропопаузой, были единичными, поэтому в обработку они не вошли.

Анализ приведенных выше данных показывает, что уровень максимального ветра в 83% случаев находится до 2 км ниже тропопаузы. В среднем это расстояние оказалось равным 1,3 км.

Из 60 случаев в 45 (75%) болтанка отмечалась под уровнем максимального ветра. В среднем нижняя граница слоя болтанки находилась в 1,7 км от уровня максимального ветра; толщина этого слоя составляла в среднем 1,0 км. В 15 случаях (25%) слой болтанки находился над уровнем максимального ветра, причем почти во всех случаях над нижней границей тропопавзы, в среднем на расстоянии от нее 0,7 км. Кроме того, в нескольких случаях болтанка наблюдалась в одном и том же полете как ниже, так и выше уровня максимального ветра.

Приведенные данные, характеризующие расположение зон болтанки по вертикали при струйных течениях, можно схематически представить так, как изображено на рис. 1.

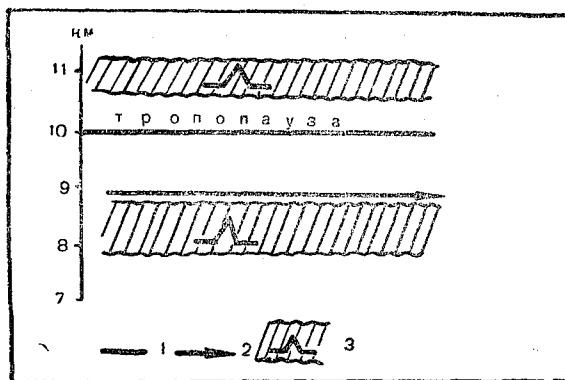


Рис. 1. Типичное расположение зон болтанки вблизи тропопавзы при струйном течении. 1 — тропопавза, 2 — уровень максимальной скорости ветра, 3 — зона болтанки.

В литературе имеются указания, что условия возникновения болтанки в верхних слоях тропосферы существенно зависят от типа тропопавзы, а именно: вероятность болтанки повышается, если нижняя граница тропопавзы выражена достаточно четко, т. е. в виде инверсии температуры или изотермии; когда нижняя граница тропопавзы обнаруживается нечетко, в виде замедленного падения температуры, болтанка маловероятна.

Действительно, как показывает анализ данных вертикального зондирования атмосферы, болтанка, наблюдавшаяся непосредственно под тропопавзой, в 81% случаев связана с типом четко выраженной тропопавзы. Однако хотя это условие и очень важное, но оно далеко не достаточное. Данный тип тропопавзы вообще является преобладающим, по крайней мере в умеренных широтах (около 90% случаев), тогда как повторяемость болтанки вблизи уровня тропопавзы составляет всего лишь 20%.

Изложенные результаты статистической обработки материала дают хотя и самые общие, но весьма необходимые представления о метеорологических условиях болтанки в верхних слоях тропосферы. Значение этих результатов состоит прежде всего в том, что они ориентируют нас в направлении более правильных путей исследования в целях разработки наилучших методов оперативного метеорологического обслуживания полетов современных транспортных самолетов. В частности речь должна идти о том, чтобы синоптики умели прогнозировать такие метеорологические условия, при которых турбулентность вызывает сильную или умеренную болтанку самолетов. Слабую болтанку можно встретить почти в каждом полете, учитывая большие расстояния, покрываемые современными самолетами без посадки. И если синоптики будут указывать в прогнозе болтанку, не считаясь с ее интенсивностью, то прогнозы с формальной точки зрения будут оправдываться хорошо, а по существу помощи летчикам от таких прогнозов будет очень мало. Однако поскольку сами летчики отмечают болтанку очень редко, всего лишь в среднем в 20% случаев, то можно было бы в прогнозах совсем не указывать болтанку. В этих случаях оправдываемость прогнозов отсутствия болтанки была бы тоже сравнительно высокой, в среднем около 80%. Но такие прогнозы были бы совершенно бесполезны. Поэтому, принимая во внимание результаты статистической обработки массового материала, мы должны изучить прежде всего те особенности развития атмосферных процессов, которые создают условия для возникновения умеренной и сильной болтанки, чтобы на основе полученных выводов составить рекомендации для прогноза такой болтанки. Результаты исследования этого вопроса и будут изложены в последующих главах.

Глава II

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ БОЛТАНКИ САМОЛЕТОВ

В качестве одной из характеристик термодинамических условий турбулентности атмосферы, вызывающей болтанку самолетов, является число Ричардсона

$$Ri = \frac{g}{T} \frac{\gamma_a - \gamma}{\beta^2}, \quad (1)$$

170352 где g — ускорение силы тяжести, T — средняя температура рассматриваемого слоя воздуха ($^\circ\text{K}$), γ_a — адиабатический (в облаках влажноадиабатический) вертикальный градиент температуры, γ — наблюдаемый в слое вертикальный градиент температуры, β — вертикальный градиент вектора средней скорости ветра.

Физическая сущность критерия Ричардсона, как известно, вытекает из гипотезы о существовании двух наиболее существенных видов превращения энергии. Первый из них представляет собой увеличение турбулентной энергии за счет кинетической энергии среднего потока. Источником прироста энергии является при этом напряжение Рейнольдса, возникающее вследствие вертикального сдвига ветра и приводящее к турбулентному переносу количества движения.

Второй вид преобразования энергии состоит в потере турбулентной энергии за счет работы, совершаемой в гидростатически устойчивой атмосфере. В результате уравнение баланса турбулентной энергии имеет вид

$$\frac{d\varepsilon'}{dt} = \int_v \left[k_\partial \beta^2 - k_T \frac{g(\gamma_a - \gamma)}{T} \right] \rho dv. \quad (2)$$

Первое слагаемое выражает степень прироста турбулентной энергии на единицу массы (k_∂ — коэффициент турбулентной вязкости по вертикали), а второе — скорость потери энергии на единицу массы (k_T — коэффициент турбулентной теплопроводности); ρ — плотность воздуха, v — объем.

Если $\frac{d\epsilon'}{dt} = 0$, то это означает, что энергия, получаемая благодаря напряжению Рейнольдса, находится в равновесии с энергией, затрачиваемой на работу вертикальных перемещений частиц в устойчивой атмосфере. Число Ричардсона при этом обращается в единицу.

Но для развития турбулентности нужно, чтобы

$$k_0 \bar{\beta}^2 - k_T \frac{g(\gamma_a - \gamma)}{T} > 0,$$

т. е. Ri должно быть меньше единицы, таким образом, единица — это критическая величина числа Ричардсона.

За последние годы было выполнено много работ, в которых авторы приходят к положительному решению вопроса об использовании критерия Ричардсона для диагноза и прогноза болтанки самолетов. Соответствующие рекомендации изложены в Руководстве по краткосрочным прогнозам погоды [20] и в ряде методических указаний.

В работе [4], появившейся в самое последнее время, даются уточнения по использованию числа Ричардсона для выявления зон болтанки и признается весьма полезным его применение в синоптической практике. В то же время в работах многих других исследователей как в СССР, так и за границей отрицается целесообразность применения этого критерия для оценки уровня турбулентной энергии в целях диагноза и прогноза болтанки самолетов. Например, Беннон [24] показал, что только 30% всех случаев болтанки в верхней тропосфере связано со значениями $Ri \leq 3.0$. Остальные 70% случаев оказываются необъясненными. Для стратосферы эта связь оказалась еще худшей. Не установлена какая-либо связь болтанки со значением Ri и в работе Н. И. Давыдова. Р. М. Меджитов [8, 9], исследовавший возможность применения Ri к прогнозу болтанки самолетов в нижней половине тропосферы, показал, что оправдываемость прогноза наличия и отсутствия болтанки составляет 50—60%, т. е. не выше оправдываемости прогноза слепых и инерционных прогнозов. К аналогичным выводам приходят Н. В. Лукьянов [7] и др.

Мы считали необходимым самым внимательным образом изучить этот вопрос с тем, чтобы получить наиболее правильное суждение о возможности использования Ri в синоптической практике. Надо иметь в виду, что критерий Ричардсона является наиболее простым и поэтому наиболее доступным для вычисления. Следовательно, если он действительно отражает в какой-то мере турбулентное состояние атмосферы, то его использование, даже в диагностическом отношении, было бы полезным. Однако на пути изучения этого вопроса мы встречаемся с большими трудностями, связанными с недостатками используемого материала, а именно:

а) Летчики обычно сообщают сведения лишь о достаточно ощутимой болтанке. Поэтому многие случаи полета в слоях с малыми значениями Ri , при которых могла бы быть слабая или умеренная болтанка, нами не использовались. В связи с этим для соответствующей статистической обработки были взяты только наиболее достоверные данные, полученные при вертикальном зондировании атмосферы. Всего было использовано 75 полетов специального зондирования в районе Москвы, в число которых входит 19 полетов с болтанкой в верхней половине тропосферы, и 60 полетов оперативного зондирования в различных пунктах территории СССР. Все последние 60 полетов относятся только к случаям с болтанкой. К сожалению, полная синхронность самолетных подъемов с температурно-ветровым зондированием была соблюдена лишь в очень немногих случаях. Расхождения по времени доходили до $1\frac{1}{2}$ —2 часов, а по месту были приблизительно в пределах 50—150 км.

б) Абсолютные значения Ri в большой степени зависят от толщины слоев, для которых рассчитывается это число. Чтобы решить вопрос о том, по каким же слоям наиболее целесообразно производить эти расчеты, нами было произведено для ряда случаев сопоставление чисел Ri , рассчитанных по слоям толщиной 1,0 км, со значениями Ri , полученными для слоев меньшей толщины, определяемых особыми точками наблюдений. Сопоставление показало, что уровень турбулентной энергии для одного и того же состояния атмосферы, как правило, оценивается различными значениями Ri . Во всей толще тропосферы часто встречаются слои, отличающиеся между собой сравнительно небольшими изменениями направления и скорости ветра по вертикали, что существенно сказывается при подсчетах Ri . Толщина этих слоев в среднем составляет около 350 м, так что одному значению Ri , рассчитанному для слоя 1,0 км, соответствует от 2 до 4 значений этого критерия, рассчитанных по меньшим слоям. Числа Ri , определяемые по слоям меньшей толщины, обычно имеют меньшие значения, чем при подсчетах по более крупным слоям; в некоторых же случаях бывает и наоборот.

В целом можно сказать, что если для укрупненного слоя $Ri \leq 2,0$, то в большинстве случаев при расчете для того же уровня по слоям меньшей толщины значения $Ri \leq 1,0$. Что касается значений $Ri > 2,0$, то в этих случаях при пересчетах по более мелким слоям малые значения Ri ($< 1,0$) встречаются сравнительно редко. Следует при этом заметить, что малые значения Ri получаются иногда при относительно слабых ветрах с неустойчивым направлением, это, по-видимому, может отражать не столько реальное состояние атмосферы, сколько недостаточную точность измерений ветра. Исходя из изложенного, можно считать, что практически нет особой необходимости детализировать расчеты и что для выявления зон турбулентности вполне достаточно ограничиваться слоями толщиной около 1 км, но не более. Этому же мнению придерживаются авторы работы [4].

Приведем основные результаты анализа значений Ri примени-

тельно к диагнозу турбулентности в верхней половине тропосферы (выше 5 км). Для этого были подсчитаны числа Ri для всех 75 дней специальных самолетных зондирований атмосферы в районе Москвы (как с болтанкой, так и без болтанки) и для 60 дней, когда наблюдалась болтанка при оперативном зондировании в различных пунктах территории СССР. При анализе учитывались значения всех слоев верхней тропосферы и нижней стратосферы, через которые пролетал самолет во время зондирования, независимо от того, была или не была отмечена болтанка в день полета и в каком слое.

Таблица 9

Повторяемость (число случаев) различных значений параметра Ричардсона при болтанке и без болтанки по данным вертикального зондирования атмосферы (верхняя половина тропосферы, нижняя стратосфера)

	Значения <i>Ri</i>					Всего
	0,1—1,0	1,1—2,0	2,1—4,0	4,1—10,0	> 10	
Специальное зондирование						
С болтанкой	10	7	8	8	7	40
Без болтанки	32	12	37	32	116	229
Вероятность болтанки (%)	24	37	18	20	6	15
Оперативное зондирование						
С болтанкой	29	16	19	7	8	79
Без болтанки	58	34	34	34	41	201
Вероятность болтанки (%)	33	32	36	17	16	28

Прежде всего обнаружилось, что распределение чисел Ri по вертикали в большинстве случаев отличается большой неоднородностью своих значений, что указывает на слоистость тропосферы в отношении уровня турбулентной энергии на различных высотах.

В табл. 9 дана повторяемость различных значений критерия Ричардсона, рассчитанного для слоев с болтанкой и без болтанки по данным вертикального зондирования атмосферы. Расчеты производились для слоев толщиной 1 км. Общее количество таких слоев для случаев специального зондирования составило 269, из них в 40 слоях отмечалась болтанка, т. е. примерно в 15% случаев. При оперативном зондировании общее количество таких слоев оказалось равным 280, из них в 79 слоях (около 28%) отмечалась болтанка.

Анализ данных, приведенных в табл. 9, показывает, что болтанка может иметь место в слоях с самыми различными значениями Ri . При этом на самые малые значения Ri (0,1—1,0), на которые должна падать наибольшая вероятность болтанки, приходится всего лишь от 25 до 37% ее случаев.

Таким образом, мы видим, что самолет, пробивая во время зондирования значительную толщу тропосферы и нижнюю часть стратосферы, нередко встречает слои с малыми значениями Ri (до 1,0), но вероятность болтанки при этом составляет только 24—33%. Некоторая разница в повторяемости тех или иных градаций Ri в зависимости от вида зондирования объясняется тем, что в первую часть таблицы (специальное зондирование) включены данные за все дни, когда были полеты как с болтанкой, так и без болтанки. Вторая же часть таблицы отражает данные только за те дни полетов, когда в каком-либо слое отмечалась болтанка. Поэтому более показательными являются данные первой части таблицы. Особенно заметная разница получилась для случаев без болтанки. Так, по данным специального зондирования 65% случаев отсутствия болтанки приходится на слои со значениями $Ri > 4,0$. Иначе говоря, большие значения Ri , указывающие на отсутствие болтанки, оправдывают себя значительно лучше, чем малые значения, которые должны указывать на наличие болтанки. В среднем же по данным обоих видов зондирования для самых малых значений Ri вероятность болтанки составляет всего лишь от 24 до 33%.

Нами не обнаружено также какой-либо связи между значениями Ri и интенсивностью болтанки, о чем можно судить по данным табл. 10. Так, например, оказалось, что в противоположность существующему мнению, большая часть случаев умеренной и сильной болтанки наблюдалась не при самых малых значениях Ri ($< 1,0$), а при значениях $Ri > 2,0$.

Из всего сказанного следует, что диагностическое значение абсолютных величин Ri очень небольшое.

В связи с этим считаем необходимым провести сравнение полученных нами результатов с результатами, доложенными М. В. Зававиной и М. З. Емельяновой на Всесоюзной конференции по авиационной метеорологии в июне 1960 г. по вопросу о применимости Ri в синоптической практике. Рекомендую рассчитывать Ri по слоям, расположенным между изобарическими поверхностями, авторы проверили опытные прогнозы болтанки самолетов, причем в качестве критического значения они принимали $Ri \leq 2,0$. Оценка результатов прогноза производилась путем вычисления оправдаваемости прогноза наличия болтанки и отсутствия болтанки, а также подсчетом числа невыявленных случаев болтанки и случаев отсутствия болтанки самолетов и коэффициента оправдаваемости Q по критерию А. М. Обухова $Q = 1 - \alpha - \beta$, где α — относительное число невыявленных зон болтанки, β — относительное число невыявленных зон отсутствия болтанки.

Прогнозы носили инерционный характер, т. е. прогнозист исходил из условия сохранения установившегося уровня турбулентной энергии в пределах шестичасового интервала времени от времени полета самолета вблизи данного пункта (на расстоянии не более 100—150 км).

Повторяемость (%) различных значений параметра Ричардсона при болтанке в зависимости от ее интенсивности

Вид зондирования	Интенсивность болтанки	Значения Ri				
		0,1—1,0	1,1—2,0	2,1—4,0	4,1—10,0	>10,0
Специальное	Слабая	20	13	20	23	34
	Умеренная и сильная	—	—	14	43	43
Оперативное	Слабая	12	27	27	22	12
	Умеренная и сильная	25	16	31	12	16

Авторы установили, что оправдываемость таких прогнозов имеет довольно высокую оценку, а именно: оправдываемость прогноза болтанки для верхнего слоя тропосферы (7—9 км) по данным Москвы, Ленинграда, Киева и Минска составляет в среднем 87 %, а оправдываемость прогноза отсутствия болтанки — 91 %. Средняя же величина коэффициента оправдываемости прогноза по Обухову (Q) равна 0,75 при $\alpha=0,20$ и $\beta=0,05$.

Это весьма высокие показатели оправдываемости прогноза болтанки, и если бы они действительно хорошо отражали фактическое состояние дела, то, вероятно, метод инерционного прогноза болтанки по критерию Ричардсона был бы одним из лучших в настоящее время. Однако, как показывают наши исследования, вопрос о применимости Ri в прогностической работе находится в гораздо более сложном положении, чем это следует из работы названных выше авторов. Если пересчитать данные, приведенные в табл. 9, в характеристические значения, предложенные Завариной и Емельяновой¹, то получим диагностические показатели, представленные в табл. 11.

Мы видим, что относительно хорошую оправдываемость могут иметь лишь диагнозы отсутствия болтанки, т. е. того состояния атмосферы, которое вообще является преобладающим. В отношении же турбулентного состояния атмосферы, которое может вызвать болтанку самолетов и которое встречается вообще сравнительно редко, инерционный прогноз на основании формального использования критерия Ричардсона имеет очень малую оправдываемость. Как уже говорилось выше, эта низкая оправдываемость проистекает из того, что в очень многих случаях болтанка отсутствует, несмотря на то, что Ri имеет значения меньшие критических.

¹ Разница состоит лишь в толщине слоев, для которых рассчитывалось Ri .

Таблица 11

Оправдываемость (%) диагноза болтанки и ее отсутствия при критических значениях Ri

Вид зондирования	Характеристики			
	Оправды- ваемость диагноза болтанки	Оправды- ваемость диагноза отсутствия болтанки	Коэффици- ент Обухова	Число случаев
Специальное	27	89	0,22	269
Оперативное	33	76	0,11	280

Нужно отметить, что составление инерционных прогнозов даже в шестичасовом (± 3 часа от времени зондирования) промежутке времени, как это рекомендуют Заварина и Емельянова, возможно лишь в весьма ограниченных случаях, так как данные зондирования поступают к синоптику обычно не раньше 3 часов от момента выпуска радиозонда. Применение же рекомендуемых положений к прогнозу без учета большой изменчивости метеорологических элементов в верхних слоях тропосферы во времени может привести к очень большим погрешностям.

Чтобы иметь представление о степени изменчивости Ri во времени, нами было проведено сопоставление значений этого критерия для одних и тех же слоев тропосферы, вычисленных по данным радиозондирования в районе Москвы.

В табл. 12 приведены результаты такого сопоставления для

Таблица 12

Повторяемость различных изменений значений Ri через 6 часов (в числителе — число случаев, в знаменателе — %). Верхняя половина тропосферы

Значения Ri в исходный срок	Значения Ri через 6 часов				Всего случаев (слоев)
	0,1—2,0	2,1—4,0	4,1—10,0	>10,0	
0,1—2,0	$\frac{3}{13}$	$\frac{7}{30}$	$\frac{4}{17}$	$\frac{9}{40}$	23 100
2,1—4,0	$\frac{8}{33}$	$\frac{3}{11}$	$\frac{4}{15}$	$\frac{11}{41}$	26
4,1—10,0	$\frac{2}{8}$	$\frac{6}{25}$	$\frac{5}{21}$	$\frac{10}{46}$	24
>10,0	$\frac{9}{14}$	$\frac{9}{14}$	$\frac{14}{22}$	$\frac{32}{50}$	64

шестичасовых интервалов за шесть суток (с 4 по 9 августа 1959 г.), а в табл. 13 — для двенадцатичасовых интервалов за период с 1 по 30 сентября 1959 г.

Приведенные данные свидетельствуют о большой изменчивости критерия Ri во времени. Особенно неустойчивы самые малые значения (от 0,1 до 2,0), т. е. как раз те, которые должны характеризовать условия, благоприятные для возникновения болтанки. В то же время большие значения Ri являются и более устойчивыми во времени.

Таблица 13

Повторяемость различных изменений значений Ri через 12 часов
(в числителе — число случаев, в знаменателе — %).
Верхняя половина тропосферы

Значения Ri в исходный срок	Значения Ri через 12 часов				Всего случаев (слоев)
	0,1—2,0	2,1—4,0	4,1—10,0	> 10,0	
0,1—2,0	$\frac{68}{35}$	$\frac{44}{24}$	$\frac{22}{13}$	$\frac{52}{28}$	$\frac{186}{100}$
2,1—4,0	$\frac{29}{35}$	$\frac{19}{23}$	$\frac{13}{15}$	$\frac{23}{27}$	84
4,1—10,0	$\frac{22}{37}$	$\frac{16}{27}$	$\frac{8}{14}$	$\frac{13}{22}$	59
> 10,0	$\frac{26}{45}$	$\frac{19}{19}$	$\frac{7}{7}$	$\frac{30}{29}$	102

В 1960 г. Д. Л. Лайхтман и В. А. Шнайдман [6] разработали теорию турбулентности в зоне струйных течений. Согласно этим авторам, из предположения о том, что число Ричардсона является критерием возникновения турбулентности, не следует, что оно должно быть единственным параметром, характеризующим установившуюся турбулентность. Интенсивность турбулентности определяется не только условиями возникновения вихревой энергии в данном слое, но и диффузией ее в соседние слои. Диффузия же вихревой энергии существенно зависит от уровня кинетической энергии турбулентности в ниже и выше лежащих слоях, т. е. от распределения метеорологических элементов в этих слоях. Поэтому между значением Ri , вычисленным для некоторого слоя, и параметрами турбулентности в этом же слое может быть лишь более или менее удовлетворительная корреляция.

Разработанная Лайхтманом и Шнайдманом теория применима для случаев, когда имеется хорошо выраженный максимум скорости ветра. Авторы исходили при этом из следующих положений. Турбулентность в струйных течениях обуславливается большими горизонтальными контрастами температуры, создающими острый

профиль распределения скорости геострофического ветра. Благодаря турбулентности профиль геострофического ветра сглаживается до реально наблюдаемого профиля. Степень сглаживания профиля ветра указывает на степень турбуликации струйного течения. Решая уравнения движения для геострофического ветра совместно с уравнением баланса турбулентной энергии, авторы получили рабочие формулы, позволяющие вычислить коэффициент турбулентности, толщину турбулизированного слоя и дисперсию пульсационной скорости, характеризующую порывистость ветра.

Эти формулы имеют соответственно следующий вид:

$$K = \frac{\omega_z}{1,6 g \beta} (v_m - v_i)^2; \quad (3)$$

$$H = 94 \sqrt{\frac{k}{\sin \varphi}}; \quad (4)$$

$$(c')^2 = \frac{0,65 \omega_z}{\sqrt{g \beta}} (v_m - v_i)^2, \quad (5)$$

где K — коэффициент турбулентности (в $\text{м}^2/\text{сек}$); H — толщина турбулизированного слоя (в м); $(c')^2$ — дисперсия пульсационной скорости в ($\text{м}^2/\text{сек}^2$); ω — угловая скорость вращения Земли — $7,29 \cdot 10^{-5} \text{сек}^{-1}$; $\omega_z = \omega \sin \varphi$; φ — широта места; g — ускорение силы тяжести — $9,81 \text{ м/сек}^2$; $\beta = \frac{\gamma_a - 1}{T}$; γ_a — адиабатический (влажноадиабатический) градиент температуры — $0,98^\circ/100 \text{ м}$ ($0,65^\circ/100 \text{ м}$); γ — средний градиент температуры слоя, для которого вычисляется K ; T — средняя температура в том же слое (в $^\circ\text{К}$); v_m — максимальная скорость ветра (в м/сек); $v_i = \frac{v_1 + v_2}{2}$ — средняя скорость ветра в слое; v_1 и v_2 — скорости ветра соответственно на верхней и нижней границе слоя, для которого вычисляется K .

Из приведенной теории следует, что в области струйного течения могут наблюдаться два турбулентных слоя: один под уровнем максимальной скорости ветра, а другой над ним, что вполне согласуется с нашими данными, приведенными на стр. 15. Предварительные выводы, полученные при экспериментальных полетах, показали, что количественные характеристики турбулентности, рассчитанные на основе теории Лайхтмана—Шнайдемана с использованием данных радиозондирования, могут быть применены для диагноза болтанки. Эта работа представляет несомненный шаг вперед на пути поисков критериев турбулентности, необходимых для прогноза турбулентности.

Вместе с тем, как показывает анализ многочисленных случаев болтанки в верхних слоях тропосферы, возникновение значительной турбулентности в этих слоях связано с неоднородным распределением температуры и ветра в горизонтальном направлении. Именно на это обстоятельство сейчас должно быть обращено внимание при

разработке теории вопроса о метеорологических условиях опасной болтанки самолетов.

Наряду с изложенным следует, однако, считать, что использование критерия Ричардсона может принести известную пользу синоптику для целей диагноза турбулентности, вызывающей болтанку самолетов в верхней половине тропосферы. Но, очевидно, для этого нужно найти какой-то другой способ его использования, поскольку применение лишь абсолютных значений числа Ri не дает, как нами показано, положительных результатов.

Выше мы отмечали, что вертикальное распределение значений Ri характеризуется большим разнообразием. В одних случаях наблюдаем равномерное распределение в значительной толще тропосферы довольно однородных (только малых или только больших) значений Ri , в других случаях это распределение заключается в чередовании слоев с самыми различными абсолютными значениями этого параметра. Еще в работе [18] нами было обращено внимание на то, что сам факт относительных изменений значений Ri по высоте указывает на возможность болтанки в зонах резких изменений данного параметра. При этом абсолютные его величины могут значительно превышать критические значения. Это положение полностью оправдывало себя и в данной работе: *болтанка встречалась как при переходе от слоя с малым значением Ri к слою с большим его значением, так и наоборот, т. е. при резком переходе от больших значений Ri к малым.* В то же время при более или менее равномерном распределении Ri со значениями меньше критических в довольно большой толще тропосферы болтанка не отмечалась. Создается впечатление, что для достижения определенного уровня турбулентной энергии, необходимого для возникновения болтанки, нужно, чтобы турбулентность «накапливалась» под каким-то задерживающим слоем. Ниже такого слоя значения Ri часто являются меньше критических, а выше — больше критических. В частности, задерживающим слоем обычно оказывается нижняя граница тропопаузы, чем главным образом и объясняется некоторое увеличение повторяемости случаев с болтанкой вблизи тропопаузы по сравнению с ниже лежащими уровнями верхней половины тропосферы (см. табл. 8). Если же задерживающие слои отсутствуют, то турбулентность, возникшая сначала в слое резкого перехода от больших значений Ri к малым, может как бы рассеиваться и тем самым не приобрести того уровня, который необходим для возникновения болтанки.

В связи с этим необходимо остановиться на роли вертикальных градиентов скорости ветра в определении уровня турбулентной энергии. Согласно критерию Ричардсона этому элементу должно придаваться наибольшее значение, что и подчеркивается в имеющихся указаниях по диагнозу и прогнозу болтанки. Например, в работе [14] говорится, что развитие турбулентности, вызывающей сильную болтанку самолетов, наиболее вероятно в тех случаях, где

Таблица 14

Повторяемость (%) болтанки самолетов различной интенсивности в зависимости от значений вертикальных градиентов вектора скорости ветра ($\bar{\beta}$)

Интенсивность	Градации значений $\bar{\beta}$ (м/сек на 100 м)						Число случаев
	0,0—0,50	0,51—1,00	1,00—1,50	1,51—2,00	2,1—2,50	>2,50	
Слабая	33	35	21	11	—	—	54
Умеренная и сильная	27	32	12	20	6	3 ¹	56

¹ Имеется лишь один случай болтанки при $\bar{\beta}=3,77$ м/сек на 100 м.

изменение скорости ветра с высотой превышает 3 м/сек (11 км/час) на 100 м.

В табл. 14 приведены данные, характеризующие фактические зависимости между болтанкой различной интенсивности и вертикальными градиентами скорости ветра. Эти данные получены при обработке материала вертикального зондирования атмосферы, причем градиенты рассчитывались для векторной скорости ветра, что в общем незначительно отличается от градиентов наблюдаемого ветра.

Из анализа приведенных данных видно, что болтанка любой интенсивности в большинстве случаев (59—65%) встречается при сравнительно небольших вертикальных градиентах скорости ветра, значения которых находятся в пределах от 0,0 до 1,0 м/сек на 100 м.

Хотя и наблюдается некоторая тенденция к увеличению повторяемости умеренной и сильной болтанки при больших градиентах по сравнению со слабой болтанкой, но все же на основании анализа данных табл. 14 говорить о прямой связи между болтанкой и вертикальными градиентами скорости ветра нельзя. Надо при этом сказать, что неоднократно встречались случаи, когда полет проходил через слои с вертикальными градиентами, доходившими до 4 м/сек на 100 м и более, а болтанки не было. Следовательно, мы должны прийти к выводу, что связь уровня турбулентной энергии, обуславливающего болтанку самолетов, с вертикальными градиентами скорости ветра, очевидно, является более сложной, чем это следует из анализа критерия Ричардсона.

Одной из важных особенностей, характеризующих условия возникновения зон болтанки в зависимости от вертикального градиента вектора скорости ветра ($\bar{\beta}$), является неоднородность значений этого элемента по вертикали, что находится в тесной связи с отме-

ченной выше неоднородностью распределения значений Ri по вертикали. Для иллюстрации этих особенностей в табл. 15 приведено несколько типичных случаев распределения $\bar{\beta}$ в слое болтанки, а также непосредственно в соседних слоях, ниже и выше слоя болтанки. Как видим, болтанка обычно наблюдается в том слое, в котором абсолютные значения $\bar{\beta}$ больше, чем в соседних слоях. Но встречаются нередко случаи, когда в выше лежащих слоях вертикальные градиенты ветра превышают таковые в слое болтанки, но болтанка при этом ограничивается лишь первым слоем. Это обычно бывает тогда, когда слой с повышенными значениями $\bar{\beta}$ бывает довольно большой мощности, т. е. тогда, когда вблизи от первого слоя с болтанкой нет задерживающего слоя.

Таблица 15

Значения вертикального градиента вектора скорости ветра $\bar{\beta}$ при болтанке
(в м/сек на 100 м)

Номера примеров	Ниже слоя болтанки	В слое болтанки	Выше слоя болтанки
1	0,5	1,0	0,3
2	0,3	0,9	0,0
3	0,2	0,8	0,7
4	0,2	1,6	0,7
5	0,0	2,0	1,4
6	1,1	2,0	2,3
7	0,5	1,2	3,4
8	0,0	2,4	2,3
В среднем	0,4	1,5	1,4

Задерживающие слои часто выявляются по кривой стратификации в виде инверсии, изотермии или замедленного падения температуры. Но иногда эта кривая не указывает на существование таких слоев, а эти слои как будто все же существуют. В этих случаях обнаруживается неодинаковое изменение температуры, происшедшее над данным пунктом, за прошедшие несколько часов до начала срока исходного зондирования атмосферы. Таким образом, если, например, в нижнем слое тропосферы, до высоты 6 км, за прошедшие 12 часов произошло понижение температуры, а выше 6 км — повышение ее, то около уровня 6 км, вследствие изменившихся условий стратификации, образовался как бы задерживающий слой. Такое положение может быть и в том случае, когда на фоне общего понижения температуры в ниже лежащем слое понижение оказалось более значительным, чем в выше лежащем.

В противоположность указанным положениям повышенный уровень турбулентной энергии нередко встречается при переходе от ниже лежащего слоя, в котором произошло повышение температуры, к выше лежащему с понижением температуры. Значения Ri при

этом резко уменьшаются. Такими изменениями температуры можно было объяснить несколько случаев умеренной и сильной болтанки самолетов в нижней стратосфере. Это было тогда, когда в тропосфере наблюдалось общее локальное потепление, нижняя граница тропопаузы при этом повышалась. Соответственно в стратосфере температура понижалась. Наибольшее же понижение температуры приходилось на тот уровень, где бывший относительно теплый стратосферный воздух сменился верхним, относительно холодным тропосферным воздухом.

В тех слоях, где температура существенно не менялась от одного срока зондирования к другому, болтанка отмечалась в единичных случаях и притом только слабая.

Изменения температуры на различных высотах нами определялись путем сопоставления на аэрологической диаграмме кривых стратификации, построенных по данным радиозондирования в два срока наблюдений, через 12 часов.

Распределение случаев с болтанкой в зависимости от характера изменения температуры в соответствующих слоях по данным вертикального зондирования атмосферы дано в табл. 16, в которой все случаи разбиты на 4 типа:

Таблица 16

Повторяемость (%) болтанки в зависимости от характера изменений температуры в соответствующих слоях верхней тропосферы и нижней стратосферы (149 случаев)

—	+—	+	=
59	25	13	3

1) Болтанка наблюдалась непосредственно в слое понижения температуры (—);

2) Болтанка наблюдалась вблизи слоев, где наблюдался переход от повышения к понижению температуры (+—);

3) Болтанка наблюдалась в слое повышения температуры (+);

4) Болтанка наблюдалась в слое, где температура существенно не изменилась (=).

Как видно из данных табл. 16, в 84% случаев болтанка наблюдалась при понижении температуры в соответствующем слое, а также вблизи уровня перехода от повышения температуры к ее понижению. В остальных 16% случаев болтанка отмечалась на фоне локального повышения температуры или без заметных ее изменений.

В целях лучшего понимания изложенных положений рассмотрим несколько примеров, представленных на рис. 2 и 3. Для каждого примера даны кривые стратификации по данным зондирования в ближайший час к моменту наблюдения над болтан-

кой (сплошные линии) и по данным предшествующего зондирования (пунктирная линия). Справа от кривых даны значения Ri (в числителе)¹ и β (в знаменателе), слева проставлены высоты

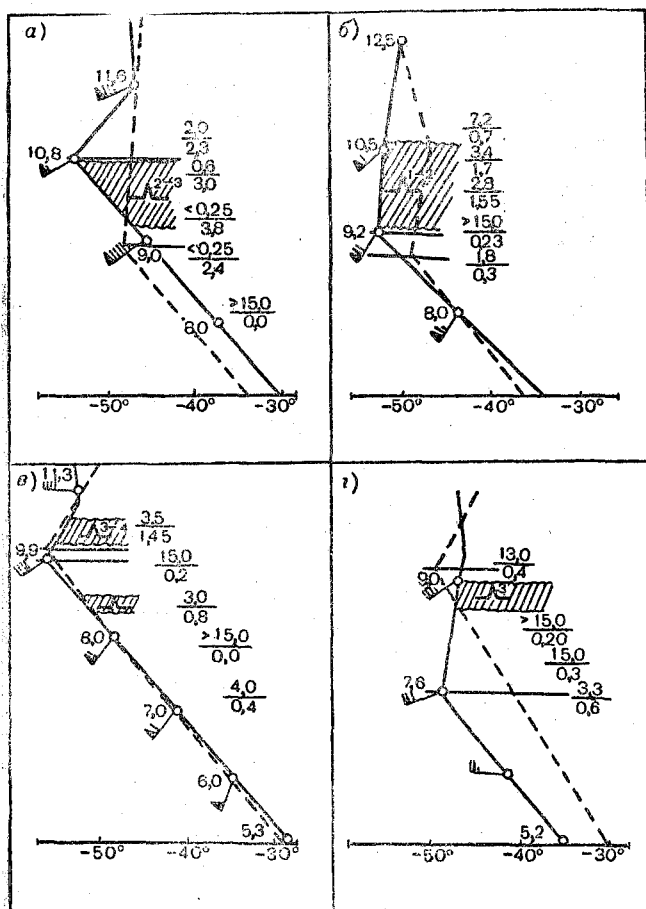


Рис. 2. Типичные изменения температуры и распределения по вертикали Ri и β при болтанке вблизи тропопавзы: а) Москва, 17 октября 1958 г. 21 час, б) Каунас, 11 апреля 1959 г. 15 часов, в) Москва, 30 ноября 1960 г. 15 часов, г) Петрозаводск, 21 апреля 1959 г. 15 часов.

(в км), штриховкой обозначены зоны болтанки, около каждого условного знака болтанки поставлена ее интенсивность (1 — слабая, 2 — умеренная, 3 — сильная), горизонтальные линии — уровни тропопавзы.

¹ Все значения Ri , превышавшие 15,0, объединялись в одну группу ($\geq 15,0$).

Рис. 2а показывает, что слой от 9,0 до 10,8 км характеризуется достаточно большими значениями $\bar{\beta}$ (2,4—3,8 м/сек на 100 м) и малыми значениями Ri ($<1,0$). Ниже и выше этого слоя значения $\bar{\beta}$ уменьшаются, а Ri увеличиваются. Во всем слое обстановка вполне благоприятна для болтанки, особенно в той его части, где произошло понижение температуры.

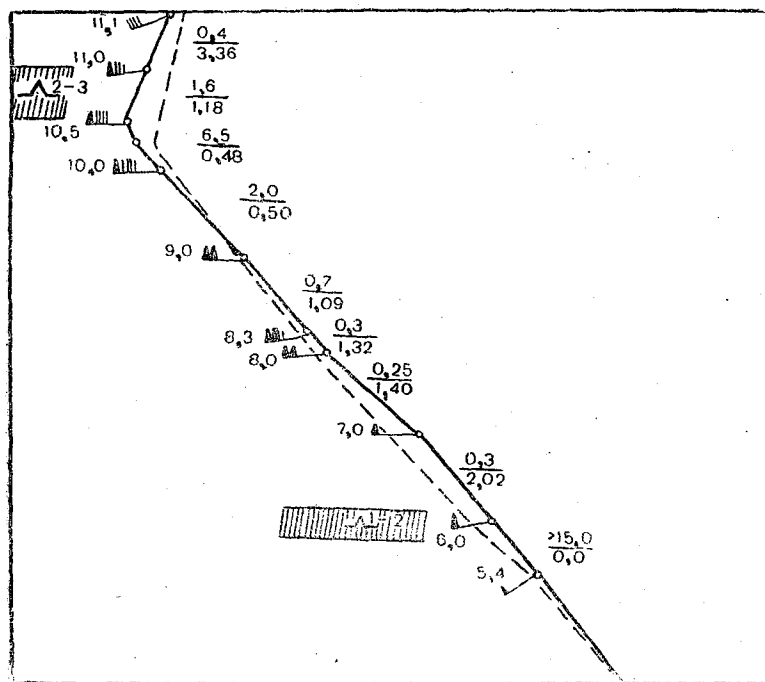


Рис. 3. Типичные распределения по вертикали Ri и $\bar{\beta}$ при струйном течении. Москва, 23 сентября 1959 г. 15 часов.

На рис. 2б мы видим во всем слое (примерно от 9,0 до 10,5 км), расположенном над нижней границей тропопавзы, значения $Ri > 1,0$, что по формальным признакам должно исключать болтанку. Фактически же она была отмечена в слое 9,2—10,5 км, что можно объяснить значительными изменениями $\bar{\beta}$ и Ri . В нижней части слоя $\bar{\beta}$ увеличилось от 0,23 до 1,55 м/сек на 100 м, соответственно число Ri уменьшилось от $>15,0$ до 2,8. На верхней границе слоя болтанки $\bar{\beta}$ уменьшилось от 1,7 до 0,7 м/сек на 100 м, соответственно Ri увеличилось от 3,4 до 7,2. Образованию зоны болтанки способствовало понижение температуры в рассматриваемом слое.

На рис. 2в нижний слой болтанки на уровне около 8,5 км связан с увеличением $\bar{\beta}$ от 0,0 до 0,8 м/сек на 100 м и уменьшением Ri от величин больше 15,0 до 3,0. Верхнему слою болтанки (в зоне тропопаузы) соответствовало увеличение $\bar{\beta}$ от 0,2 до 1,45 м/сек на 100 м и уменьшение Ri от 15,0 до 3,5.

Значения $\bar{\beta}$ и Ri в случае, представленном на рис. 2г, не показательны для болтанки как по их абсолютным значениям, так и по относительным изменениям. Очевидно, главную роль в возникновении значительной болтанки в слое на уровне около 9 км сыграли резкие изменения температуры ниже и выше этого слоя.

Рис. 3 иллюстрирует условия полета в струйном течении. Судя по значениям Ri , можно было бы ожидать болтанку в довольно мощном слое, по крайней мере в слое от 6,0 до 9,0 км. В действительности болтанка была на тех уровнях, где значения Ri испытывали значительные изменения с высотой, а именно: вблизи уровня 6,0 км число Ri изменилось от величины больше 15,0 до 0,3, при изменении $\bar{\beta}$ от 0,0 до 2,02 м/сек на 100 м; вблизи уровня 10,5 км изменения Ri были от 6,5 до 1,6 при соответствующих изменениях $\bar{\beta}$ от 0,48 до 1,18 м/сек на 100 м.

Верхний слой сильной болтанки в данном случае (10,5—11,0 км) располагался в зоне тропопаузы, чему способствовало понижение температуры на данном уровне.

Таким образом, изложенные положения и приведенные примеры дают возможность более правильно подойти к диагнозу турбулентности на основании данных радиовеетрового зондирования атмосферы. Для этого требуется:

- 1) нанести на бланк аэрологической диаграммы кривые стратификации по данным зондирования в последний и предыдущий сроки;

- 2) определить вертикальные градиенты векторной скорости ветра по километровым слоям с учетом особых точек и соответственно произвести расчет чисел Ri по сведениям последнего зондирования (полученные данные проставляются вблизи основной кривой стратификации);

- 3) на основе анализа изменений значений $\bar{\beta}$ и Ri с высотой, а также происшедших изменений температуры и в соответствии с изложенными выше положениями дать заключение о возможности образования зон болтанки в различных слоях верхней половины тропосферы и нижней стратосферы.

Полученные диагностические выводы можно использовать и для прогноза на ближайшие часы, если аэросиноптическое положение существенно не изменится в это время.

Глава III

АЭРОСИНОПТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ТУРБУЛЕНТНОСТИ, ВЫЗЫВАЮЩЕЙ БОЛТАНКУ САМОЛЕТОВ В ВЕРХНИХ СЛОЯХ ТРОПОСФЕРЫ И НИЖНЕЙ СТРАТОСФЕРЕ

1. Общие сведения

В современной литературе, посвященной изучению турбулентности в верхней тропосфере и нижней стратосфере, большое место отводится аэросиноптическим условиям этого явления. Однако полученные многочисленными авторами выводы еще недостаточно определены, поэтому использование их в оперативной работе всегда связано с большими затруднениями. Сущность этих выводов в основном сводится к следующим положениям:

1. Болтанка наблюдается чаще всего при полетах во фронтальных зонах, под тропопаузой, а следовательно, в струйных течениях, причем главным образом на их циклонической стороне. Хорошо известен построенный Бэнноном [24] комбинированный средний разрез струйных течений, приведенный на рис. 4. Согласно Бэннону, наибольшее число случаев болтанки (75%) сосредоточено влево от оси струйного течения. При этом слои с болтанкой связаны с большими вертикальными градиентами скорости ветра.

2. Зоны болтанки встречаются в большинстве случаев в области высотных циклонов и ложбин.

3. Наиболее благоприятные условия для возникновения болтанки создаются в районах с циклонической кривизной изогипс и в области их конвергенции.

4. Области с дивергирующими изогипсами не характерны для возникновения болтанки.

5. Болтанка над тропопаузой (в нижней стратосфере) явление очень редкое; если же она там и встречается, то бывает слабой и в слое небольшой толщины.

В качестве теоретического обоснования для некоторых из приведенных положений часто привлекается критерий Ричардсона. Как известно, на основе положения Троицкого о зависимости между вертикальными градиентами скорости ветра и горизонтальными градиентами температуры для высот, где не сказывается

влияние трения о поверхность земли, выражение для Ri может быть записано в следующем виде:

$$Ri = \frac{l^2 T (\gamma_a - \gamma)}{g \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)^2}, \quad (6)$$

где $\frac{\partial T}{\partial n}$ — горизонтальный градиент температуры, $l = r \sin \varphi$, φ — широта места, ω — угловая скорость вращения Земли.

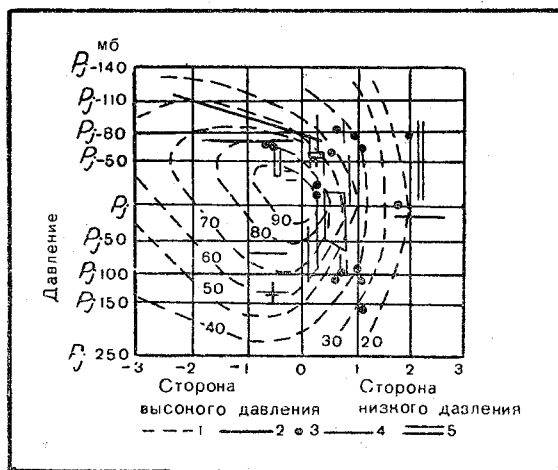


Рис. 4. Распределение зон сильной турбулентности при ясном небе относительно оси струйного течения (по Беннону). 1 — изотахи скорости ветра, нормально к разрезу (в % максимума скорости), 2 — среднее положение тропопавзы, 3 — изолированные наблюдения за турбулентностью, 4 — наблюдения за турбулентностью вдоль линии, 5 — наблюдения за турбулентностью в целой зоне.

Так как высокий уровень турбулентной энергии определяется малыми значениями Ri , то из анализа выражения (6) вытекает, что чем больше горизонтальный градиент температуры, тем выше уровень турбулентной энергии, тем вероятнее болтанка. Так как с большими горизонтальными градиентами температуры в свободной атмосфере связаны большие скорости ветра, то отсюда следует, что в соответствующих зонах должны быть благоприятные условия для развития турбулентности. Именно это положение обосновывает сложившееся представление о большой вероятности опасной болтанки самолетов при полете в струйном течении. На

этом же основании делается вывод о том, что более благоприятные условия для возникновения турбулентности должны быть в области конвергенции воздушных течений и менее благоприятные в области дивергенции течений, поскольку в первом случае горизонтальные градиенты температуры увеличиваются, а во втором — уменьшаются.

В 1953 г. Аракава [22, 23], изучавший случаи болтанки в верхней тропосфере при ясном небе, предложил критерий устойчивости в зональном потоке, обосновывающий значение для турбулентности циклонического сдвига ветра. Аракава исследовал влияние центробежных сил, всегда действующих на движущуюся частицу в условиях вращающейся Земли. При этом он исходил из представления о том, что частица, сдвинувшаяся поперек потока, сохраняет свой момент количества движения относительно земной оси.

Критерий Аракава имеет вид

$$-\frac{\partial u}{\partial y} = \omega \sin \varphi + \frac{2u}{R} \operatorname{tg} \varphi, \quad (7)$$

где y — меридиональная координата, положительная к северу, u — зональный ветер, φ — широта, ω — угловая скорость вращения Земли, R — радиус Земли. Турбулентность возникает в тех случаях, когда циклонический сдвиг ($-\frac{\partial u}{\partial y} > 0$) превышает величину, получаемую по данной формуле. Этим критерием можно объяснить часто встречающиеся случаи болтанки в левой части струйного течения, как это было показано Бенноном.

В работе [16] дается теоретическое решение вопроса о роли кривизны изогипс в развитии турбулентности. Автор уподобляет циклоническое образование некоторому объему жидкости, имеющему форму цилиндра с вертикальной осью, в котором частицы жидкости движутся по круговой орбите. Предполагается, что этот объем жидкости смещается поперек траектории, по которой движется вся жидкость. В таком случае для устойчивости основного движения необходимо, чтобы силы, действующие на сместившийся объем жидкости, стремились вернуть его в начальное положение. Этими силами являются центробежная сила и сила Кориолиса. Решение задачи приводит к следующему неравенству, характеризующему условие устойчивости движения в циклоне

$$-\frac{\partial c}{\partial r} < \frac{\omega_1^2 r}{c - r \omega \sin \varphi}, \quad (8)$$

где r — расстояние от оси цилиндра, на которое сместился со своей траектории элементарный объем жидкости; $c = c_0 + c'$ — скорость частиц, переместившихся из положения r_0 (начальное) в положение r ; ω_1 — угловая скорость частиц жидкости, ω — угловая ско-

рость вращения Земли. Из этого выражения вытекает, что вероятность нарушения устойчивости должна возрастать по мере приближения к центру циклона и уменьшаться по мере удаления к его периферии. В центральной части циклона, где $r \approx 0$, турбулентность должна наблюдаться очень редко.

Выполняя аэросиноптический анализ имевшегося в нашем распоряжении материала, мы исходили из перечисленных выше положений, качественно оценивали их прогностическую обеспеченность и старались выявить другие характеристики атмосферных процессов в целях использования их для прогноза болтанки. Важной особенностью данной части работы было то, что при анализе в равной мере обращалось внимание как на случаи полета с болтанкой, так и на случаи без болтанки. Анализ процессов на высотах производился главным образом по картам АТ₃₀₀, поскольку полеты производились преимущественно на высотах 8—9 км. Во многих случаях привлекались карты АТ₂₀₀ и АТ₄₀₀, что, однако, не вносило каких-либо принципиальных отличий от выводов, полученных по картам АТ₃₀₀. Большое внимание уделялось анализу данных о ветре, чему во многом помогали более подробные, чем у летчиков, записи синоптиков в протоколах полетов.

2. Анализ данных статистической обработки материала

Статистической обработке синоптических характеристик подверглись лишь те случаи, которые были получены от летчиков по трассе Москва—Иркутск. При статистической же обработке данных об отсутствии болтанки, в связи с теми или иными особенностями высотного барического поля (табл. 17), мы ограничились

Таблица 17

Распределение случаев с болтанкой и без болтанки в зависимости от синоптического положения у поверхности земли (Москва — Иркутск)

	Фронты					Без фронтов	Всего
	холодные	теплые	квази-ционарные	не определенные	всего		
С болтанкой . .	84	45	30	36	195 (67%)	95 (33%)	290 (100%)
Без болтанки . .	92	124	63	—	—	—	279
Вероятность болтанки (%) . .	48	27	32	—	—	—	—

лишь случаями, когда на каком-либо участке было непосредственное влияние какого-либо фронта, видимого на приземной синоптической карте. Поэтому приводимые ниже данные о вероятности

болтанки имеют не абсолютное, а относительное значение, поскольку подсчеты производились лишь для ограниченных типов синоптических положений.

Данные, приведенные в первой строке табл. 17 показывают, что болтанка в большинстве случаев (67%) наблюдалась в тех районах, где поблизости у поверхности земли проходили те или иные фронты, большей частью холодные. В тех районах, где у поверхности земли никаких фронтальных разделов не было, болтанка отмечалась лишь в 33% случаев. Отсюда следует, что при прогнозе болтанки в верхней тропосфере нужно обращать большое внимание на положение и смещение фронтов. Это необходимо прежде всего для прогноза облачности, с которой довольно часто связана турбулентность.

Однако далеко не во всех случаях полета через зоны фронтов встречается болтанка. Как видно из данных табл. 17, в гораздо большем числе случаев полета через фронтальные зоны болтанка не отмечалась. Если взять отношение числа случаев с болтанкой к общему числу случаев полета через различные виды фронтов, то полученная вероятность болтанки составит для холодных фронтов 48%, для теплых 27% и квазистационарных 32%.

Все это говорит о том, что анализ одного лишь приземного синоптического положения мало дает указаний синоптику для прогноза болтанки на больших высотах. Для этого необходимо учитывать и какие-то другие факторы, к числу которых, очевидно, нужно отнести в первую очередь те или иные особенности развития процессов на уровне полета. С целью выявления этих особенностей

Таблица 18

Распределение случаев с болтанкой и без болтанки в зависимости от вида высотного барического поля

	Ложбина	Гребень	Прямолинейные изогипсы	Седловина	Не определено	Всего
С болтанкой	68	76	64	38	40	286
Без болтанки	54	35	69	30	—	188
Вероятность болтанки (%)	56	68	48	56	—	—

случаи с болтанкой и без болтанки были отнесены к одному из четырех видов барического поля на уровне AT_{300} . Это следующие виды: 1) ложбина — циклоническая кривизна изогипс, 2) гребень — антициклоническая кривизна изогипс, 3) поле прямолинейных изогипс или с незначительной кривизной, 4) седловина — неопределенная кривизна изогипс. Часть случаев из-за неясности не классифицировалась.

Рассмотрение данных табл. 18 указывает на существование несколько лучшей связи условий возникновения турбулентности на больших высотах с характером барического поля на этих высотах, по сравнению с приземным полем. Однако и эта связь недостаточно обеспечена, чтобы ее можно было использовать для прогноза болтанки. Но при такой обработке материала выявилась одна очень важная деталь. Оказалось, что *при пересечении высотных гребней болтанку можно встретить с несколько большей вероятностью, чем при пересечении высотных ложбин*. Во всяком случае, в противоположность ранее существовавшим представлениям о том, что болтанка встречается преимущественно при полетах через высотные ложбины, сейчас следует иметь в виду, что это явление почти равновероятно как в области высотных ложбин, так и в области высотных гребней.

Это положение подтверждается и данными табл. 19. До сих пор многие исследователи отдавали предпочтение конвергенции высотных воздушных течений, считая ее главным фактором, определяющим турбулентность на больших высотах. Так, по данным И. А. Клемина и Н. З. Пинуса, полученным в 1954 г., в конвергирующих циклонически изогнутых изогипсах наблюдалось 56% случаев с болтанкой, т. е. почти в три раза больше, чем в дивергирующих (15,6%) или в параллельных изогипсах (14,9%).

Таблица 19

Распределение случаев с болтанкой и без болтанки в зависимости конвергенции или дивергенции изогипс AT_{300}

	Циклоническая кривизна			Антициклоническая кривизна		
	конвергенция	дивергенция	всего	конвергенция	дивергенция	всего
С болтанкой	20	48	68	28	48	76
Без болтанки	19	35	54	29	38	67
Вероятность болтанки (%)	50	58	56	49	56	53

В отношении абсолютных значений повторяемости болтанки при конвергенции изогипс наши результаты оказались близкими к тем, которые были получены Клеминым и Пинусом в 1954 г. Имеется, однако, существенное отличие в отношении роли дивергенции изогипс, а также параллельных изогипс (см. табл. 19). Трудно объяснить это различие. Возможно, что здесь сказались различные методы обработки материала. Так, указанные авторы характер распределения изогипс определяли для слоев достаточно большой толщины (3—8, 8—14, 3—14 км), тогда как в нашей работе этот фактор учитывался лишь для одного уровня (близкого

к уровню полета). С другой стороны, как уже раньше указывалось, наши подсчеты в данном случае производились для ограниченных типов синоптических процессов, т. е. для тех, когда имело место пересечение тропосферных фронтов. Во всяком случае обработка имевшегося у нас материала показала, что условия возникновения турбулентности в верхней тропосфере и нижней стратосфере почти в равной мере определяются как конвергенцией, так и дивергенцией воздушных течений; последняя имеет даже несколько большее значение.

Представляло интерес выяснить, как выражается статистическая связь между болтанкой и скоростью ветра. Имелось при этом в виду, что согласно выражению (6), болтанка должна повторяться наиболее часто при относительно сильных ветрах. С этой целью была вычислена повторяемость различной интенсивности болтанки самолетов при определенных градациях скоростей ветра, наблюдавшихся во время полета в зоне болтанки. Результаты представлены в табл. 20.

Таблица 20

Повторяемость (%) различной интенсивности болтанки самолетов при различных градациях скоростей ветра

Интенсивность болтанки	Градация скорости ветра (км/час)						Общее число случаев
	0—50	51—100	101—150	151—200	201—250	>250	

Сообщения летчиков

Слабая	15	30	27	18	8	2	230
Умеренная	15	53	22	10	—	—	78
Сильная	10	60	30	—	—	—	10
Средние данные	13	48	26	9	3	1	318

Оперативное зондирование

Слабая	20	44	24	12	—	—	54
Умеренная	20	50	22	5	3	—	36
Сильная	25	35	30	10	—	—	20
Средние данные	2	43	25	9	1	—	110

Данные об абсолютных значениях повторяемости, полученные при обработке различных видов материалов, несколько отличаются между собой. Это можно объяснить, в первую очередь, неодинаковым количеством использованного материала. Однако эти данные достаточно согласованно показывают, что при любой интенсивности болтанки явно преобладают случаи относительно небольших скоростей ветра, до 100 км/час. Наиболее же интересным является тот факт, что сильная болтанка в подавляющем большинстве слу-

чаев (60—70%) приходится на градации скоростей ветра 0—50 и 51—100 км/час. В то же время при относительно сильном ветре (>100 км/час) повторяемость слабой болтанки оказывается значительно большей, чем повторяемость сильной болтанки.

Таким образом, перечисленные в начале этого раздела прогностические положения не имеют необходимой статистической обеспеченности. В частности, как показывают результаты проведенной нами обработки материала, изложенные в табл. 18 и 19, болтанка может наблюдаться не только в циклонических, но даже в большей степени и в антициклонических высотных образованиях. Очевидно, также не вполне соответствует действительности то понимание роли струйных течений, т. е. сильных ветров, согласно которому соответствующие области являются непосредственным сосредоточением зон опасной турбулентности. То же нужно сказать и в отношении роли конвергенции и дивергенции воздушных течений. Все эти положения требуют, по нашему мнению, пересмотра и уточнения.

Дальнейшее изучение аэросиноптических условий болтанки заключалось в тщательном анализе конкретных случаев, при этом случаев как с болтанкой, так и без болтанки. Оказалось, что ни одна из полученных нами связей болтанки с различными особенностями атмосферных процессов не имеет должной статистической обеспеченности, чтобы ее можно было непосредственно успешно применить для прогноза. Имеются лишь две особенности, которые могут с достаточным основанием быть положены в основу синоптического метода диагноза и прогноза зон болтанки. Одна из них заключается в горизонтальных градиентах ветра, а вторая — в неупорядоченных, конвективных вертикальных движениях воздуха.

Первая из названных особенностей самым тесным образом связана со струйными течениями, а вторая — с грозовыми очагами. Поэтому мы и рассмотрим условия, приводящие к возникновению болтанки в областях струйных течений и грозовых очагов. При этом будем рассматривать их не изолированно, а в тесной связи с особенностями высотного барического поля, с конвергенцией и дивергенцией воздушных течений, с тропосферными фронтами и другими элементами.

3. Роль струйных течений в определении условий, благоприятных для возникновения болтанки самолетов

Отождествляя большие горизонтальные градиенты температуры в свободной атмосфере с большими значениями горизонтальных градиентов давления (геопотенциала), мы можем говорить лишь о существовании в данной области больших скоростей ветра. Хотя сильные ветры по своей структуре носят обычно турбулентный характер, но из этого еще вовсе не следует, что в зонах больших скоростей ветра обязательно должна существовать турбулентность, опасная для полетов.

Анализ использованного материала показал, что при полете непосредственно в зоне сильных ветров болтанка самолетов типа ТУ-104 и ИЛ-18 часто совершенно отсутствует или бывает слабой, в виде незначительных толчков, отдельных колебаний и рыскания самолета. В то же время нередко случаи, когда при входе самолета в зону сильных ветров появляется и очень неприятная болтанка. При этом ширина зоны болтанки обычно имеет ограниченные размеры и по выходе из этой зоны болтанка прекращается, хотя полет еще продолжается в области значительных скоростей ветра.

В других случаях резко выраженная болтанка начинается в момент выхода из области сильных ветров или, наоборот, прекращается в момент входа в зону сильных ветров. Иными словами, связь уровня турбулентной энергии в атмосфере с горизонтальными градиентами температуры и, следовательно, со скоростями ветра гораздо более сложная, чем это дает выражение (6) для числа Ричардсона.

В первой части нашей работы было показано, что слабая болтанка — явление довольно частое. Она возникает при самых различных синоптических условиях, и, вероятно, во многих случаях ее возникновение вызывается не только метеорологическими причинами. Аэросиноптические условия болтанки самолетов выявляются в более отчетливой форме при анализе случаев умеренной и сильной болтанки.

Такой анализ убедительно показал, что условия возникновения значительной турбулентности на больших высотах зависят не только от абсолютных значений горизонтальных градиентов температуры и геопотенциала, но и от относительного их распределения в данной области. Иначе говоря, эти условия зависят от степени изменения скорости ветра не только по вертикали, но и по горизонтали в рассматриваемом районе. *Турбулентность, опасная для полета, создается главным образом в зонах резкого изменения горизонтальных градиентов температуры и геопотенциала, а следовательно, в зонах резкого перехода от области сильных ветров к области относительно слабых ветров, т. е. в области значительных горизонтальных градиентов скорости ветра.* О значении вертикальных градиентов скорости ветра в определении условий турбулентного состояния атмосферы говорилось в первом разделе настоящей работы. Сейчас мы рассмотрим условия возникновения болтанки в связи с горизонтальными градиентами ветра или так называемыми горизонтальными сдвигами ветра.

При анализе карт AT_{300} или AT_{200} (в зависимости от высоты полета) выявились два основных типа горизонтальных сдвигов ветра, обнаруживаемых по характеру поля геопотенциала на картах соответствующих поверхностей, а именно:

1. Боковой сдвиг ветра. Он проявляется в резком уменьшении горизонтальных градиентов геопотенциала (температуры) в направлении, нормальном к потоку сильного (струйного) ветра.

2. Сдвиг ветра по потоку. Этот сдвиг возникает при значительном уменьшении горизонтального градиента геопотенциала (температуры), т. е. при ослаблении ветра в направлении потока.

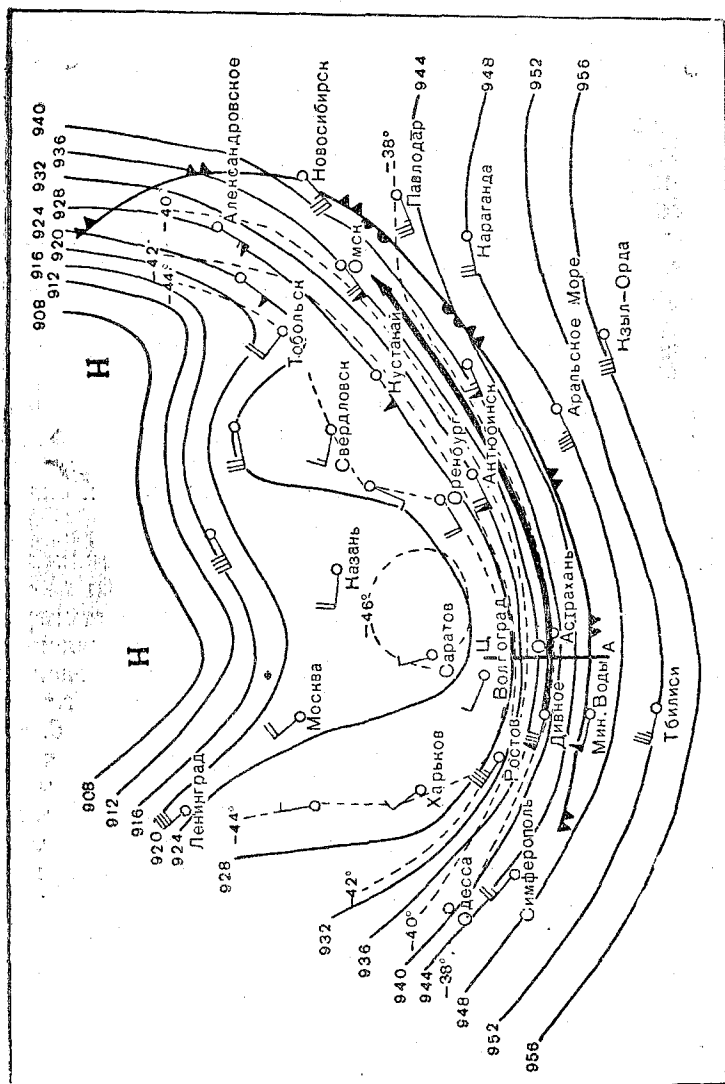


Рис. 5. Карта АТ₃₀₀, 3 часа 29 июня 1959 г. Горизонтальные сдвиги ветра (боковые и по потоку).

Чтобы облегчить читателю распознавание на аэрологических картах горизонтальных сдвигов ветра, обратимся к рассмотрению карты АТ₃₀₀, 3 часа 29 июня 1959 г. (рис. 5). Мы видим здесь хорошо выраженное струйное течение, идущее в направлении Одесса — Актюбинск — Новосибирск. Это течение образовалось в свя-

зи с вторжением в южные районы Европейской территории СССР и в Западную Сибирь холодного арктического воздуха. Ось струйного течения проходит за линией холодного фронта. Та часть струйного течения, которая располагается влево от его оси, если смотреть по направлению ветра, называется циклонической стороной, соответственно справа — антициклонической.

Таким образом, если взять, например, поперечный разрез струйного течения по линии АОЦ (район Волгоград — Минеральные Воды), то в направлении ОЦ имеем циклонические сдвиги ветра, а в направлении ОА — антициклонические.

Рассматриваемое струйное течение ограничивается и слева и справа значительными сдвигами ветра, особенно на циклонической стороне. Например, в районе Дивное — Волгоград скорость ветра изменяется соответственно от 160 до 20 км/час. Отметим, что на участке Ростов — Оренбург боковые сдвиги ветра выражаются в резком его ослаблении без заметных изменений направления.

Вторая область боковых сдвигов ветра связана с высотной ложбиной, расположенной к северо-востоку от Свердловска. Вдоль оси этой ложбины, являющейся линией конвергенции, имеет место резкое изменение скорости и направления ветра. Наиболее сильные ветры наблюдаются в данном случае в передней (правой) части ложбины; слабые ветры — в тыловой (левой) части ложбины.

На этом же рисунке мы видим горизонтальные сдвиги ветра по потоку. Одна область таких сдвигов ветра совпадает с дельтой струйного течения, в направлении Джезказган (восточнее Актюбинска) — Павлодар. Ветер в указанном направлении ослабевает от 130 до 70 км/час.

Другая область горизонтальных сдвигов ветра по потоку располагается в направлении Ленинград — Москва. Как видно на рис. 5, зона сдвигов ветра по потоку характеризуется расходимостью (дивергенцией) изогипс, при этом некоторые из них имеют антициклоническую кривизну.

Для того чтобы показать, какое значение имеют горизонтальные сдвиги ветра в определении условий возникновения болтанки самолетов, было взято 246 случаев болтанки по данным летчиков из числа 286, представленных в табл. 18, и каждый из этих случаев был отнесен к какому-либо типу сдвига ветра. Кроме этого, из 188 случаев отсутствия болтанки были взяты те из них, которые также подходили к указанным типам сдвигов ветра. Таких случаев оказалось 112. Результаты подсчета, относительно к интенсивности болтанки, приведены в табл. 21.

Приведенные данные, характеризующие зависимость условий возникновения болтанки от горизонтальных сдвигов ветра при различных формах барического поля, являются наиболее убедительными по сравнению со всеми другими зависимостями, установленными ранее. При этом вероятность болтанки как при боковых циклонических сдвигах ветра, так и при сдвигах ветра по потоку почти одна и та же и составляет около 80%. Весьма показательным яв-

**Распределение случаев с болтанкой и без болтанки (по сообщениям летчиков)
в зависимости от типов горизонтальных сдвигов ветра**

	Боковые сдвиги ветра				Сдвиги ветра по потоку				
	циклонические		антициклонические	всего	передняя часть ложбины (тыл гребня)	тыловая часть ложбины (передняя часть гребня)	вход фронтальной зоны	дельта фронтальной зоны	всего
	без изменения направления ветра	с изменением направления ветра							
С болтанкой . . .	48	72	10	130	55	26	4	31	116
Без болтанки . . .	12	20	24	56	14	11	22	9	56
Вероятность болтанки (%) . . .	80	78	29	—	80	70	15	78	—

дается и тот факт, что при боковых антициклонических сдвигах ветра, а также во входе фронтальной зоны (конвергентная часть струйного течения) вероятность болтанки очень невелика.

А. Болтанка при боковых сдвигах ветра

Боковые сдвиги ветра наиболее отчетливо выражены в тех случаях, когда струйные течения связаны с тропосферными холодными и квазистационарными фронтами (рис. 5). В этих случаях ось струйного течения располагается за линией фронта, на расстоянии 100—300 км в передней части высотной ложбины.

Циклонические сдвиги ветра образуются в местах перехода от области активной высотной фронтальной зоны к области, занятой окклюзированной частью циклона. Чаще всего эти сдвиги выражаются не только в значительном ослаблении ветра, но и в изменении его направления. Антициклонические сдвиги ветра наблюдаются вблизи линии холодного или квазистационарного фронта, т. е. в местах перехода из фронтальной зоны в однородную теплую воздушную массу.

Ввиду отсутствия на некоторых станциях фактических данных о ветре наши схемы пополнены значениями градиентного ветра, а также данными, полученными от летчиков (скорости ветра даны в км/час).

На рис. 6 показано аэросиноптическое положение, типичное для образования боковых сдвигов ветра. Как эти, так и все последующие рисунки взяты для тех случаев, при которых болтанка была подтверждена несколькими сообщениями летчиков или синоптиков. Те зоны болтанки, которые были подтверждены фактическими

данными, обозначены на рисунках густой штриховкой. Точечным пунктиром обведены районы предполагаемой болтанки. В данном случае (рис. 6) в южной части струйного течения сдвиг ветра почти совпадает с осью высотной ложбины и проявляется как в рез-

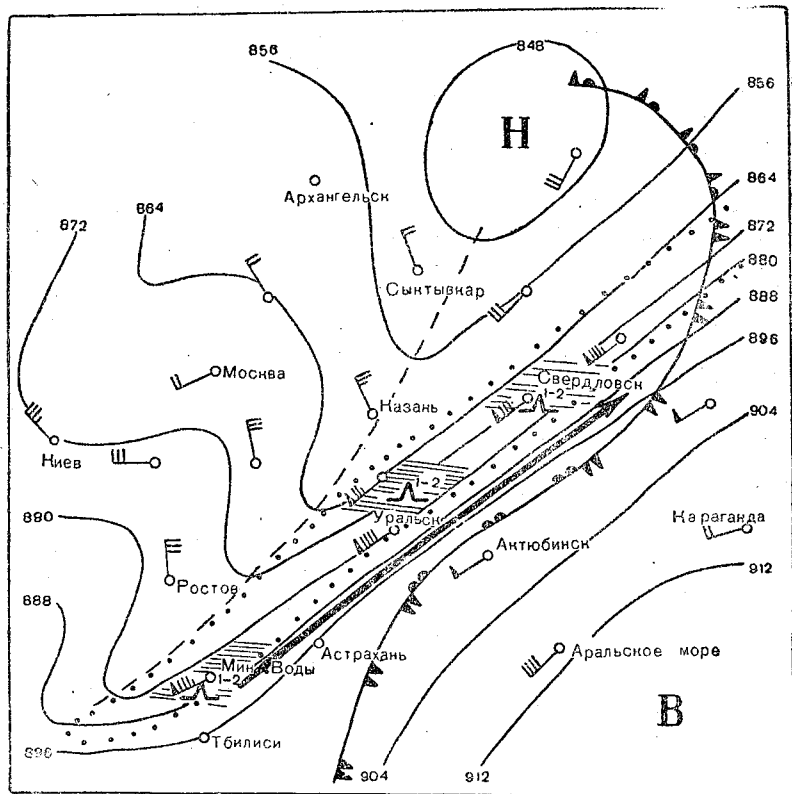


Рис. 6. Карта АТ₃₀₀, 3 часа 29 февраля 1959 г. Болтанка в области струйного течения при боковых сдвигах ветра.

ком ослаблении ветра при переходе из передней в тыловую часть ложбины (соответственно от 150—180 до 60 км/час), так и в изменении направления от юго-западного на северо-западное. В северной части струйного течения сдвиг ветра выражается главным образом в изменении скорости его в передней части ложбины.

В случае теплого фронта, если последний располагается почти параллельно изогипсам, ось струйного течения находится впереди линии фронта, обычно на расстоянии 300—500 км. В этом случае сдвиги ветра могут наблюдаться при переходе от высотного гребня к высотному циклону; эти сдвиги выражаются обычно в ослаблении ветра без изменения его направления.

Болтанка при боковых сдвигах ветра отмечается, как правило, в области сильного ветра, т. е. в самом струйном течении, слева от

его оси. Ширина этой зоны составляет 100—150 км. Таким образом, пересекая всю область струйного течения в направлении, нормальном к общему потоку, самолет испытывает болтанку в течение 10—15 минут. После этого, несмотря на то, что полет продолжается еще в области сильного ветра, болтанка прекращается. Если же полет будет производиться в направлении, параллельном потоку (по ветру или против ветра), то болтанка, естественно, будет ощущаться на протяжении нескольких сот километров.

По сообщениям летчиков, по интенсивности такая болтанка оценивается чаще всего как умеренная или сильная, напоминающая езду по булыжной мостовой. Если полет совершается на высоте 8—10 км, то болтанка большей частью наблюдается над облаками или даже при совершенно ясном небе.

Расположение зоны болтанки по вертикали существенно зависит от положения уровня максимального ветра, который, как было показано на рис. 1, располагается большей частью ниже тропопаузы, на расстоянии в среднем около 1,7 км. По отношению же к этому уровню обычно наблюдаются два слоя с повышенной турбулентностью — один под и другой над осью струйного течения. Толщина турбулизированных слоев около 1 км. При этом болтанка наиболее интенсивна в нижнем турбулентном слое. На самой оси болтанка наблюдается весьма редко.

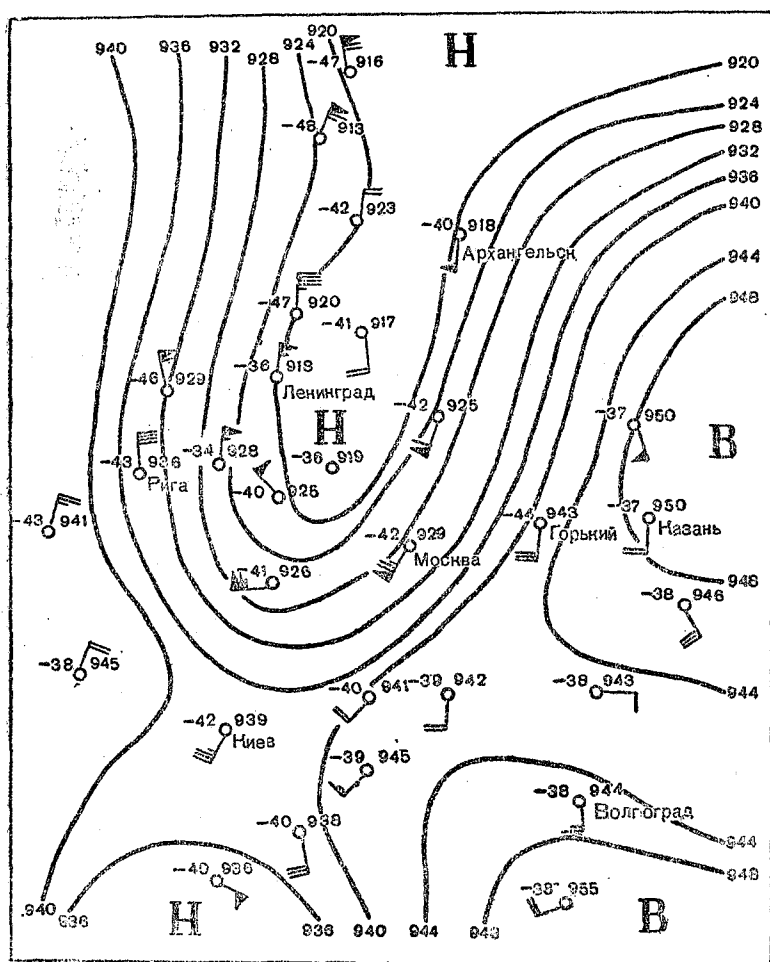
Переход от слоя без болтанки к слою с болтанкой под уровнем максимального ветра обычно выражается в резком увеличении скорости ветра; верхний же турбулизированный слой связан с быстрым ослаблением ветра.

Сопоставление описанных случаев болтанки со случаями, когда полет происходил через обширные высотные циклоны (антициклоны) или ложбины (гребни), но болтанка отсутствовала или была слабой, позволяет сделать следующий вывод.

Если в области того или иного высотного барического образования, например, циклона (рис. 7), отсутствуют резко выраженные сдвиги ветра, то, несмотря на значительные скорости ветра в передней и тыловой части данного образования, болтанка в верхней тропосфере, как правило, отсутствует или встречается лишь местами слабой интенсивности.

Итак, еще раз следует подчеркнуть, что необходимым условием для возникновения турбулентности на циклонической стороне струйного течения должно быть наличие в непосредственной близости от него области со слабым ветром. Если при этом средний градиент скорости ветра, подсчитанный между двумя станциями, отстоящими на расстоянии не более 400 км, составляет около 20 км/час или на небольшом участке превышает 50 км/час на 100 км, то в зоне струйного течения можно ожидать умеренную (до сильной) болтанку. Напрашивается мысль, что беспокойное состояние атмосферы в подобных случаях есть результат активного турбулентного перемешивания между воздушными массами, имеющими различные скорости движения.

Горизонтальная протяженность зон турбулентности может быть очень большой, значительно превышать 1000 км. Но так как направление этих зон почти никогда не совпадает с направлением



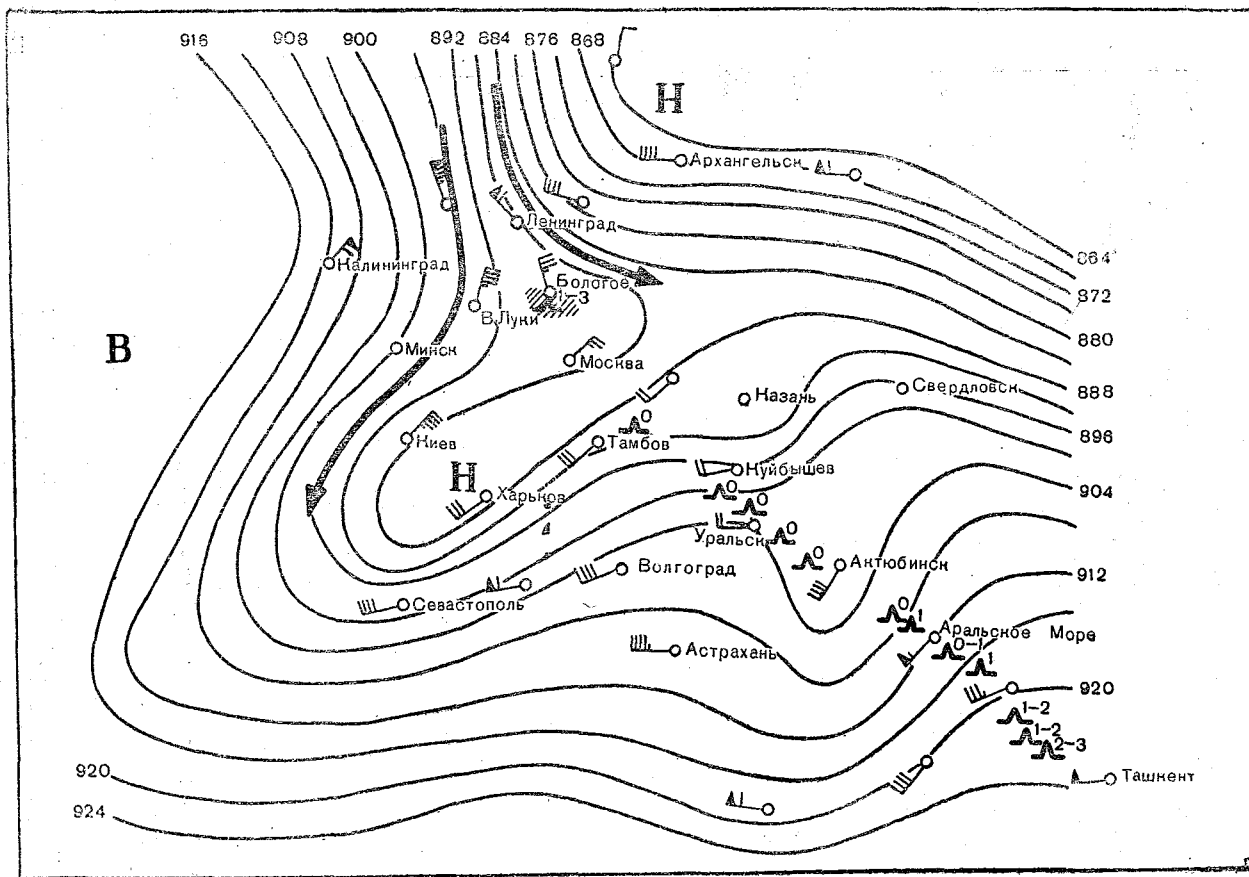


Рис. 8. Карта $\Delta T_{\text{ср}}$ 15 час 27 февраля 1960 г. Болтанка при горизонтальных сдвигах ветра по потоку в зоне

Б. Болтанка при горизонтальных сдвигах ветра по потоку

Сдвиги ветра по потоку заслуживают особого внимания, так как на эти сдвиги приходится наибольшее количество случаев сильной болтанки, причем многие из них наблюдаются при ясном небе. В первую очередь это относится к тем сдвигам, которые выражаются в уменьшении горизонтальных градиентов геопотенциала (температуры) в направлении потока, что характерно для дельты фронтальной зоны. При этом нередко имеется переход кривизны изогипс от циклонического или прямолинейного вида к антициклоническому. В других случаях сохраняется прямолинейность изогипс, но с хорошо выраженной расходямостью.

Рассмотрим несколько типичных схем развития аэросиноптических процессов, при которых возникают сдвиги ветра по потоку.

На рис. 8 показано поле AT_{300} , характеризующееся разветвлением фронтальной зоны и соответствующего ей струйного течения. Это разветвление в районе Ленинграда вызвано вхождением с юга в систему обширной высотной депрессии, расположенной на севере, нового циклона, ранее развивавшегося на другой фронтальной зоне. Вследствие этого струйное течение, направленное с северо-запада на юго-восток, разветвляется. Основная часть струи круто повернулась к югу при антициклонической кривизне изогипс. В результате образовался горизонтальный сдвиг ветра по потоку в направлении Ленинград — Москва, что послужило непосредственной причиной возникновения зоны болтанки в районе Бологое (более подробный анализ см. ниже).

Частный случай такого процесса представлен на рис. 9. Эта схема отображает вторжение холодного арктического воздуха в тылу неглубокой ложбины, расположенной к юго-западу от Свердловска. Указанная ложбина входит в систему основного высотного циклона, находящегося на Крайнем Севере. Струйное течение, направленное с севера, благодаря существованию другого циклона к юго-западу от Свердловска, испытывает ветвление. Поэтому в тылу ложбины, недалеко от ее оси, вследствие расходяемости изогипс образуется зона умеренной болтанки. Это положение, как и предыдущее, типично для возникновения болтанки при ясном небе.

К этому же типу процессов, порождающих весьма интенсивную турбулентность, относится аэросиноптическое положение, представленное на рис. 10. В данном случае сильная болтанка отмечена при совершенно ясном небе на участке Горький — Казань при полете в области высотной барической седловины. Образование здесь зоны болтанки можно объяснить, с одной стороны, дивергирующими сильными северными ветрами над северо-восточными районами Европейской территории СССР, с другой — дивергирующими юго-западными потоками над южными ее районами.

Большое значение для образования зон умеренной и сильной турбулентности имеют процессы, характеризующиеся быстрым пе-

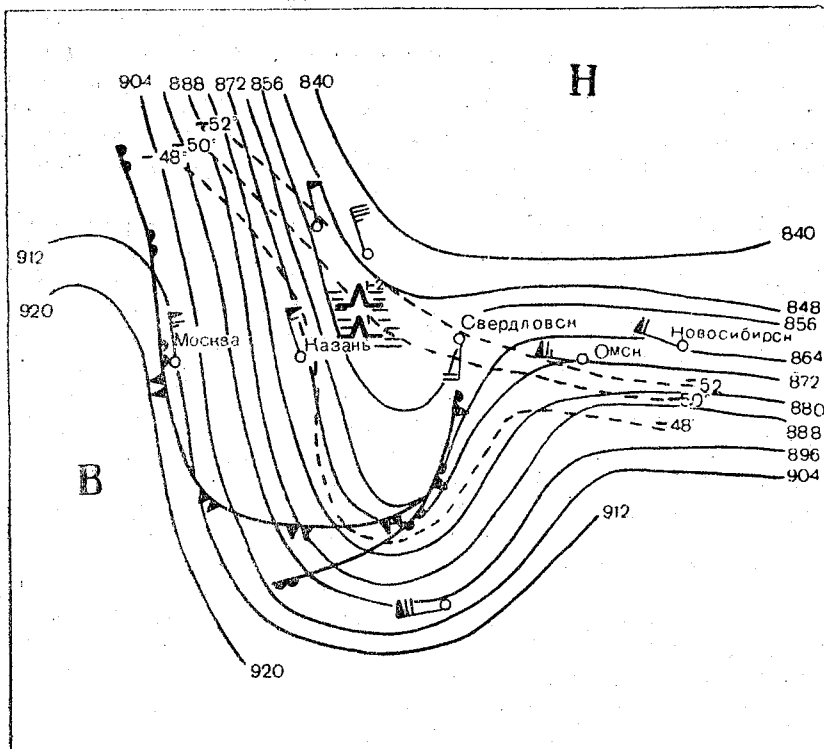


Рис. 9. Карта AT_{300} , 3 часа 23 марта 1959 г. Болтанка при сдвиге ветра по потоку в тылу высотной ложбины.

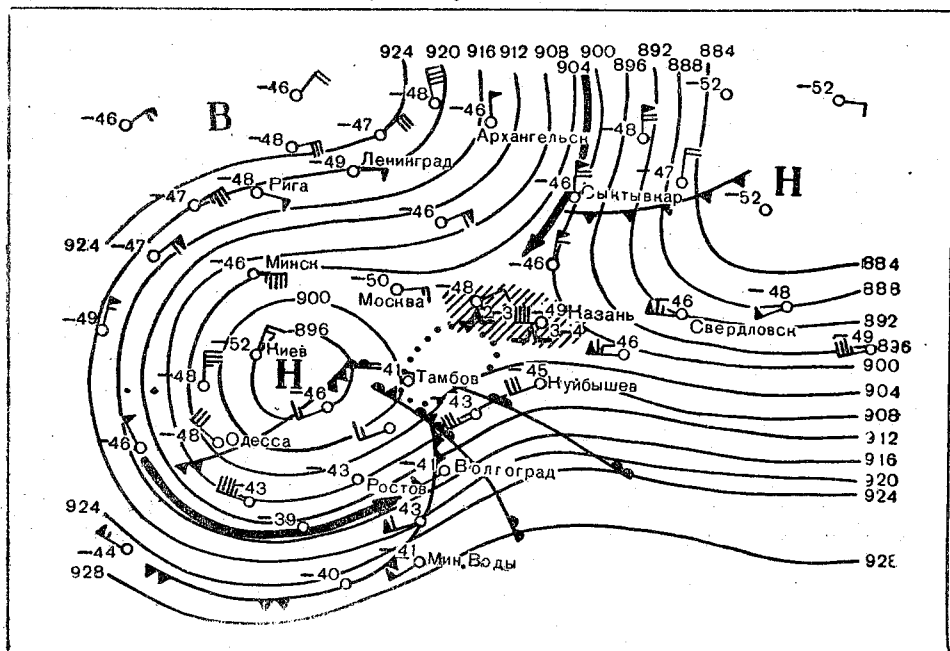


Рис. 10. Карта AT_{300} , 15 час. 29 сентября 1959 г. Болтанка в седловине.

ремещением западных и южных циклонов (рис. 11, 12). Большие скорости смещения этих циклонов определяются большой активностью соответствующих высотных фронтальных зон. Максимальные скорости ветра в конвергентных частях указанных фронтальных зон нередко превышают 300 км/час. Дельта фронтальной зоны в каждом из этих случаев находится над передней частью циклона, где осуществляется активная адвекция тепла. Вдоль этой дельты наблюдаются слабо дивергирующие изогипсы, характеризующие постепенное ослабление ветра в направлении общего потока.

Очевидно, в возникновении турбулентности в этих случаях известную роль играют также и боковые сдвиги ветра, наблюдающиеся слева и справа от потока. На всем протяжении области дивергенции, т. е. на расстоянии до 1000 км и более, наблюдается умеренная до сильной болтанка, перемежающаяся отдельными бросками и покачиваниями. Толчки и удары действуют во всех направлениях, как снизу или сверху, так и сбоку. Эта болтанка часто происходит при полете в перистых облаках; толщина слоя болтанки бывает до 2—3 км и обычно достигает нижней границы тропопавузы.

Схема, представленная на рис. 13, иллюстрирует образование зоны дивергенции воздушных течений вблизи точки окклюзии. Главной особенностью данного процесса является то, что наличие тропосферного фронта в совокупности с зоной дивергенции создает здесь очень благоприятные условия для образования и развития мощных кучевых и кучево-дождевых облаков, особенно в теплые времена года. Таким образом, в отличие от схем, представленных на рис. 6, 8, 9, 10, когда болтанка наблюдается обычно при ясном небе, в последнем примере болтанка, как правило, происходит при наличии мощных облаков и грозových явлений (более подробно см. ниже).

Ввиду большого значения зон дивергенции укажем на некоторые их особенности, которые следует учитывать при диагнозе и прогнозе болтанки самолетов в верхней тропосфере и нижней стратосфере.

В конвергентной части струйного течения, где преобладают наиболее сильные ветры, вертикальные движения нестационарности являются нисходящими и сопровождаются ростом давления у поверхности земли. В зоне же дивергенции, где наблюдается относительное ослабление ветра, эти движения являются восходящими; у поверхности земли наблюдается при этом падение давления. *Область болтанки располагается над районом восходящих движений и начинается она приблизительно от линии смены знака вертикальных движений, т. е. на границе перехода по потоку от области роста давления к области падения.* Но, очевидно, не эти вертикальные движения вызывают болтанку самолетов, поскольку они носят упорядоченный характер и скорость их составляет всего лишь несколько сантиметров в секунду. Надо полагать, что в зоне расхождения изогипс на общем фоне упорядоченных восходящих дви-

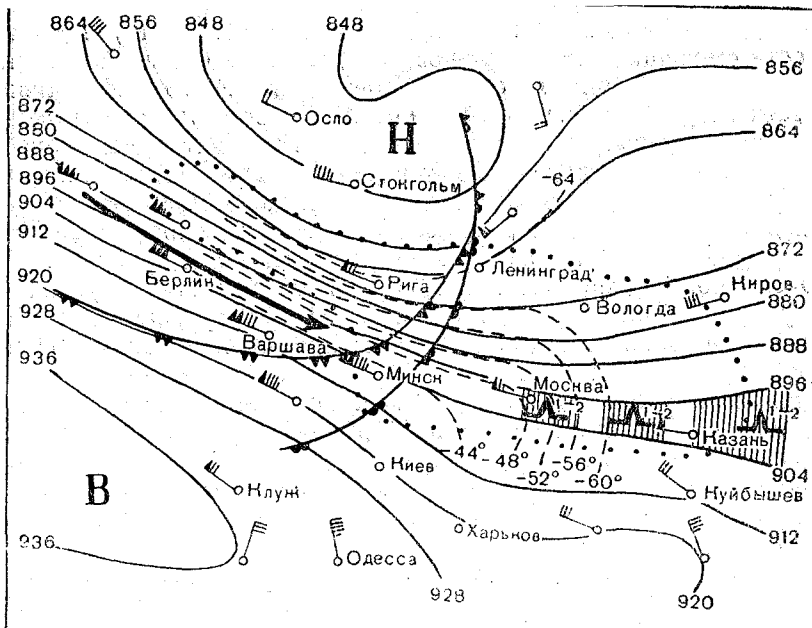


Рис. 11. Карта АТ₃₀₀, 3 часа 5 декабря 1960 г. Болтанка в дельте высотной фронтальной зоны, вдоль которой быстро перемещаются циклоны с запада на восток.

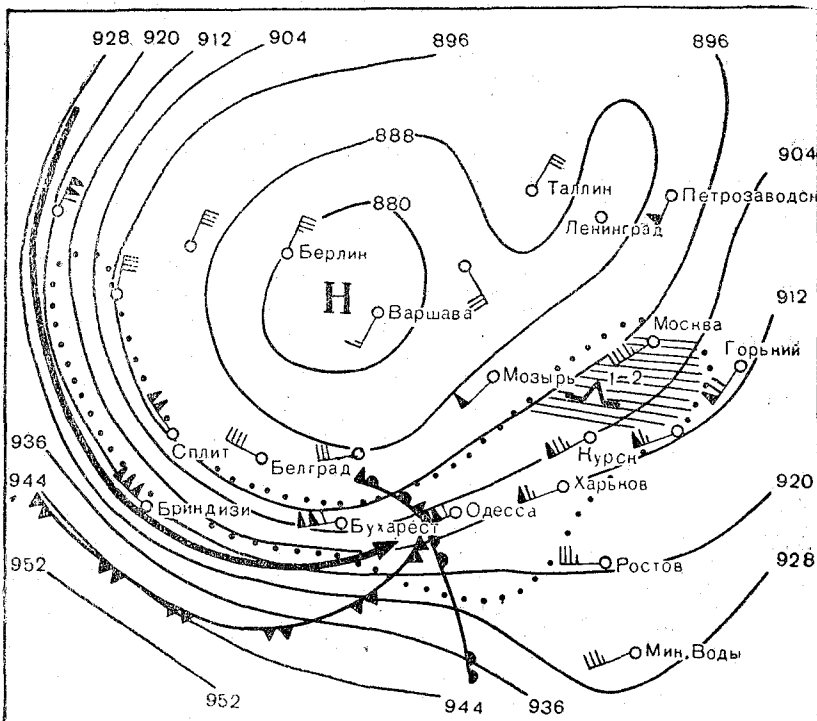


Рис. 12. Карта АТ₃₀₀, 15 час. 17 октября 1958 г. Болтанка в дельте высотной фронтальной зоны при быстром перемещении южных циклонов.

жений существуют и движения турбулентного характера, скорость которых составляет несколько метров в секунду. Об этом говорят иногда некоторые подробности в описании характера болтанки. Так, например, в нашем материале имеется следующая запись летчика, совершавшего полет на высоте 9 км, на участке Свердловск — Москва 27 декабря 1958 г.: «До Красноуфимска на эше-

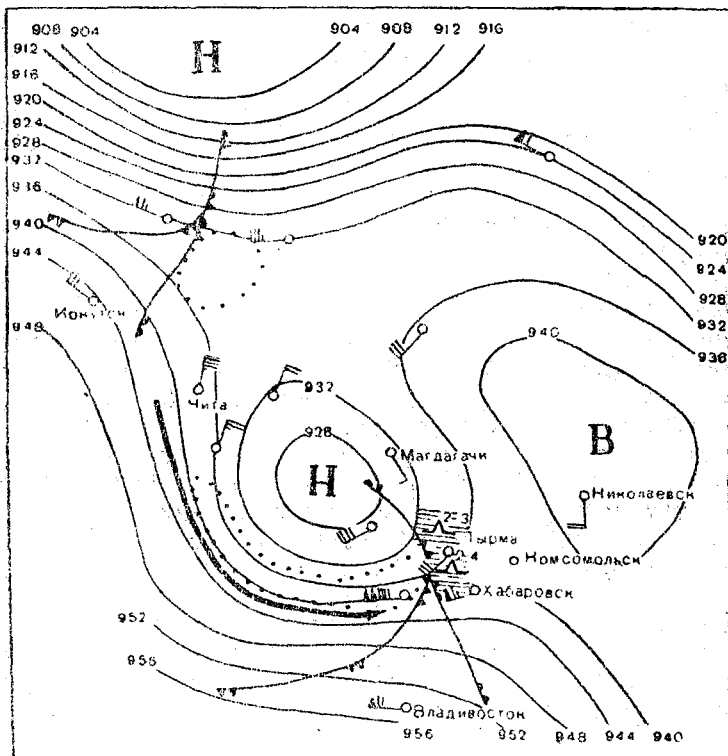


Рис. 13. Карта АТ₃₀₀, 3 часа 31 августа 1959 г. Болтанка в районе точки окклюзии.

лоне спокойно. Над Янаулом в 13 час. 40 мин. самолет плавно стало поднимать (вертикальным потоком) вверх. Заметили вертикальный поток до 12 м/сек (по вариометру). До этого штурвалом очень тяжело работать. Триммером самолет стал слушать рулей». Полет происходил в тылу высотной ложбины, в области расходимости изогипс по потоку. Имеется несколько случаев внезапных бросков самолета вниз, что также наблюдалось в зоне хорошо выраженной дивергенции изогипс и изотерм со значительным ослаблением ветра по потоку.

В бортовых журналах синоптиков в нескольких случаях встречались записи такого рода: «Самолет «потянуло» вверх и на протя-

жении нескольких минут болтанка проявлялась в виде упорядоченных подъемов и опусканий». Это явление, свидетельствующее о наличии значительных вертикальных движений, отмечалось по западной периферии высотного гребня, недалеко от его оси, в зоне дивергенции воздушных течений.

В период проведения специальных летных экспедиций в августе 1959 г. на Дальнем Востоке при полете в дельте фронтальной зоны отмечались случаи, когда машину сильно тянуло вниз. Одновременно вблизи маршрута полета наблюдались развитые кучево-дождевые облака.

Болтанка при горизонтальных сдвигах ветра по потоку, в отличие от боковых сдвигов, как правило, отмечается при относительно слабом ветре.

Чем резче выражена расходимость изогипс и чем сильнее ветер в конвергентной части струйного течения, тем резче выражен сдвиг ветра и тем вероятнее интенсивная болтанка. В этих случаях болтанка проявляется нередко в виде бросков. При этом ширина зоны болтанки, простирающейся в направлении ветра, сравнительно небольшая и составляет 100—150 км, а в поперечном направлении 200—400 км. При максимальных скоростях ветра в конвергентной части фронтальной зоны, составляющих 120—130 км/час и более, можно ожидать сильную болтанку.

В случаях постепенно дивергирующих изогипс при активной адвекции теплого (нередко тропического) воздуха протяженность зоны болтанки может составить несколько сот километров.

По отзывам специалистов Среднеазиатского научно-исследовательского гидрометеорологического института и Среднеазиатского госуниверситета, неоднократно летавших при данном типе процессов, возникающая болтанка является весьма упорной и длительной. По их мнению, болтанка в этих случаях есть следствие энергичного преобразования термобарического поля тропосферы, процессов непрерывно происходящей адаптации полей ветра и давления. Мы можем добавить к этому, что здесь, в частности, происходит, очевидно, адаптация барического ветра к термическому вследствие того, что речь идет о молодых быстро движущихся циклонах. Сильная турбулентность, как правило, охватывает слой толщиной 2—3 км и доходит до тропопаузы.

При максимальных скоростях ветра в конвергентной части струйного течения 180—200 км/час и более болтанка бывает умеренной до сильной, но обычно без значительных бросков.

Возникает вопрос, насколько опасна в отношении болтанки область конвергенции воздушных течений во входе высотной фронтальной зоны. Этот вопрос исследован очень слабо ввиду недостаточного количества фактических данных. Вообще же рассматриваемая часть фронтальной зоны должна быть менее благоприятной для возникновения значительной турбулентности. Преобладание здесь нисходящих вертикальных движений, сопровождающихся ростом давления у поверхности земли, приводит к более устойчивой

стратификации атмосферы, что не способствует развитию турбулентности в верхней половине тропосферы. Если же болтанка здесь и бывает, то она, по-видимому, вызывается боковыми сдвигами ветра.

4. Болтанка в зоне грозových очагов

Летние случаи болтанки в верхних слоях тропосферы наблюдались, по сообщениям летчиков, преимущественно во время полета в зоне грозových очагов. Болтанка при этом возникала чаще всего при входе самолета в верхнюю часть Сб, что заставляло летчиков набирать большую высоту и лететь выше облаков. Нередко интенсивная болтанка отмечалась и при пролете между облаками. Наряду с этим иногда летчики, пролетая между облаками, совершенно не испытывали болтанки. Аналогичные данные об условиях полета мы встречаем и в протоколах полетов синоптиков, а также и в протоколах экспериментальных полетов. В целом же нужно иметь в виду, что при встрече с грозowymi очагами, распространяющимися нередко до самых верхних слоев тропосферы, всегда возникает большая угроза умеренной или сильной болтанки. Поэтому правильный прогноз развития мощных грозových очагов по трассе полета уже в значительной мере обеспечивает правильность прогноза болтанки самолетов.

В настоящее время для прогноза образования и развития мощных кучево-дождевых облаков и гроз, кроме обычных синоптических приемов, применяются различные методы расчета стратификации атмосферы, в частности расчеты так называемой вынужденной конвекции.

В данной работе к анализу случаев болтанки самолетов в зонах грозových очагов мы подошли с тех же позиций, что и к другим случаям, т. е. с учетом особенностей барического и термического полей на больших высотах. Оказалось, что из 23 случаев болтанки, отмеченной при полетах в зонах грозовой деятельности, 18 случаев (78%) совпадали с дивергенцией воздушных течений на уровне 300 мб.

Итак выходит, что в зонах высотной дивергенции воздушных течений болтанка может встретиться как при совершенно ясном небе, так и при наличии мощных облаков типа Сб и грозových явлений. В первом случае явление болтанки чаще всего бывает в холодное время года, во втором — в теплое. Общей причиной болтанки в обоих случаях являются, по мнению автора, значительные вертикальные движения, возникающие в области дивергенции воздушных течений на больших высотах. Однако для появления облаков Сб на этих высотах необходимо, чтобы были прежде всего благоприятные условия для их образования в нижней половине тропосферы. Такие условия создаются в летний период года, чаще всего при прохождении холодных фронтов, фронтов окклюзии, а иногда и теплых фронтов. Поэтому *если под зоной верхней дивергенции*

находится какой-либо из указанных типов фронтов, то при наличии в нижних слоях достаточной влажности воздуха этим обеспечивается развитие мощных Сб вплоть до тропопаузы, причем в случаях теплого фронта облака Сб обычно развиваются на фоне облачной системы Ns — As — Cs.

Если же под зоной дивергенции фронтов не имеется, а также отсутствуют условия для развития термической конвекции, то болтанка в верхней тропосфере будет наблюдаться при ясном небе. При наличии же даже хорошо выраженных в нижних слоях тропосферы холодных фронтов и фронтов окклюзии, но при отсутствии над ними зоны дивергенции облака Сб, как правило, не достигают больших высот, и полет на большой высоте проходит спокойно. Поэтому один и тот же фронт, в зависимости от того, как выражена область высотной дивергенции, на одних участках дает мощную облачность и сильные осадки, а на других участках эти явления выражены значительно слабее.

В процессе выполнения данного исследования, по совету В. А. Джорджио, мы познакомились с работами индийских метеорологов, посвященными изучению условий образования гроз. Наиболее полно этот вопрос изучен К. Рамасвами [27]. Он исследовал аэросиноптические условия крупномасштабной конвекции, вызывающей сильные грозовые шквалы на северо-востоке Индии и в Восточном Пакистане (нор-вестеры), а также конвективные бури (андхи) над Западным Пакистаном и остальной частью Северной Индии.

Он считает, что приземные синоптические карты и карты нижней тропосферы дают очень мало для понимания развития процессов, приводящих к образованию грозовых явлений. Решение задачи может быть найдено только в анализе зон высотной дивергенции в субтропическом струйном течении, которые создают условия для развития крупномасштабной конвекции.

Наиболее благоприятные условия для развития мощной крупномасштабной конвекции создаются в восточной части ложбины и западной части гребня, так как здесь на нижнюю конвергенцию накладывается верхняя дивергенция. Здесь по всей тропосфере развиваются восходящие вертикальные движения. Роль процессов нижних слоев сводится при этом лишь к обеспечению воздушных масс влагой.

На основе анализа многочисленных случаев Рамасвами разработал пять схем длинных волн в субтропических струйных течениях, типичных для образования крупномасштабной конвекции. Одна из этих схем, представляющая собой сильную дивергенцию изогниси впереди оси высотной ложбины (AT_{300}) при меняющемся горизонтальном сдвиге ветра, является наиболее типичной для захватывающей обширную площадь крупномасштабной конвекции (рис. 14).

Чем сильнее струйное течение, тем эффективнее проявление крупномасштабной конвекции. Рамасвами подсчитал, что увели-

чение скорости на 35% эквивалентно увеличению дивергенции на 80%.

Выявленные нами условия возникновения умеренной и сильной болтанки при горизонтальном сдвиге ветра по потоку как при грозах, так и без гроз, хорошо согласуются с указанным Рамасвами типом высотного барического поля. Очевидно также, что эти особенности высотного барического поля должны являться необходимыми и для мощного развития термической конвекции. Кроме того, при анализе материала выявилась необходимость пересмотра существующего положения о роли очагов холода в верхней половине тропосферы в образовании ливней и гроз. Оказывается, что внутримассовые ливни и грозы, связанные с мощным развитием облаков Сб, образуются не столько непосредственно в очагах холода, сколько на их периферии, где существует зона высотной дивергенции воздушных течений.

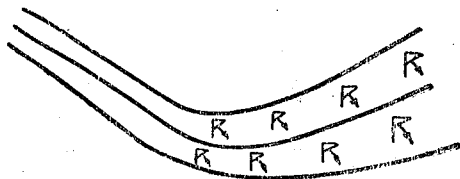


Рис. 14. Схема AT_{300} , наиболее типичная для образования крупномасштабной конвекции (по Рамасвами).

Проиллюстрируем указанные положения на некоторых примерах.

Пример 1. Экспериментальный полет по трассе Хабаровск — Магдагачи — Хабаровск был осуществлен 31 августа 1959 г. с 3 час. 25 мин. до 7 час. 38 мин. Полет происходил в дельте фронтальной зоны по юго-восточной периферии высотного циклона (рис. 13). Ветры по всему маршруту были слабые; область более сильных ветров располагалась к юго-западу от маршрута. Существенной особенностью данной обстановки является расположение зоны высотной дивергенции вблизи точки окклюзии приземного циклона. Это обстоятельство, как и наличие самого фронта окклюзии, способствовало образованию по маршруту мощных кучевых и кучево-дождевых облаков. Таким образом, данный пример, во-первых, интересен потому, что он иллюстрирует те аэросиноптические положения, при которых в области горизонтального сдвига ветра по потоку образуются мощные облака Си и Сб, во-вторых, мы можем показать здесь те характерные особенности условий полетов, которые создаются вблизи и внутри самих облаков в верхних слоях тропосферы. Кстати сказать, эти условия хорошо описал С. М. Шметер [21], использовавший свои наблюдения и в данном полете.

Некоторые записи визуальных наблюдений, взятых из протокола полета, приведены в табл. 22.

Очень интересную особенность возникновения болтанки отметил в данном полете Шметер при прохождении через перисто-слоистые облака (рис. 15) и у «стен» этих облаков в районе Хабаровска

Данные визуальных наблюдений по маршруту Хабаровск — Магдагачи
31 августа 1959 г.

Время (час. мин.)	Место	Высо- та (м)	Интенсивность болтанки	Визуальные наблюдения
3.42	Район Хабаров- ска	7 540	Слабая до уме- ренной	Нижняя граница Cs; облака плотные
3.49	То же	9 330	Сильная	Верхняя граница Cs очень волнистая, в вершинах волн ме- стами сквозь верх- нюю границу Cs пробивается вер- шина Cb calv
4.07	Район Волочаев- ки	9 670	Слабая до уме- ренной	Болтанка в ясном небе
4.08		9 390	Умеренная до сильной	Верхняя граница Cs
4.25	Район Тырмы	10 000	Слабая	Подходили к Cb, машину тянет вниз
4.30		10 940	Очень сильная	Провал машины в ясном небе
4.43	Между пункта- ми Зей и Тыр- ма	10 770	Сильная	Проход через седло- вину Cb; справа и слева очаги. Ма- шину сильно тянет вниз
4.52		11 620	Слабая	Проход на 200— 300 м выше верх- ней границы Cb calv. Машину тянет вниз
4.53		11 620		Ось облака. Маши- ну тянет вверх
5.05		11 320		Проход над фрон- том Cb

на высоте 10 760 м (рис. 16). При подходе к Cs самолет неожидан-
но дважды резко бросило вниз, вслед за чем началась сильная бол-
танка. Верхняя граница Cs была сильно всхолмлена, а на боковой
поверхности последних были хорошо различимы вертикально ори-
ентированные «нити».

Приведенные записи свидетельствуют о наличии сильных упоря-
доченных вертикальных движений в зоне дивергенции изогипс и
прекрасно иллюстрируют условия полета в области развивающихся
Cu и Cb.

Пример 2. 8 августа 1959 г. после продолжительного периода
погоды без осадков, в районе Москвы прошла сильная гроза с лив-
нем. Гроза надвинулась с запада в 16 час. 55 мин. и продолжалась
с небольшими перерывами около двух часов. Количество выпавших
осадков составило за это время около 30 мм.

Гроза была вызвана прохождением слабо выраженного холодного фронта, который в свою очередь был связан с циклоном, находившимся над северными районами Европейской территории СССР. На рис. 17 показана карта AT_{300} по наблюдениям в 15 час.

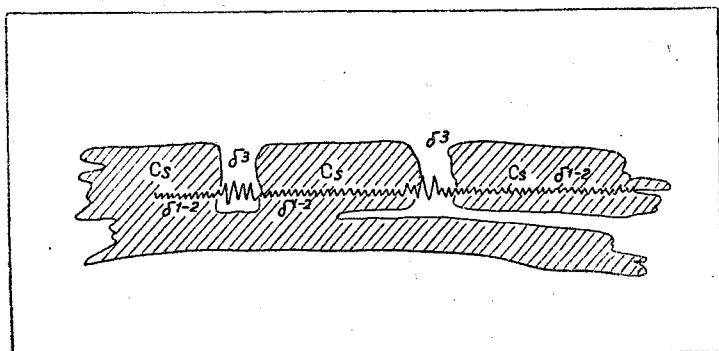


Рис. 15. Болтанка в перисто-слоистых облаках.

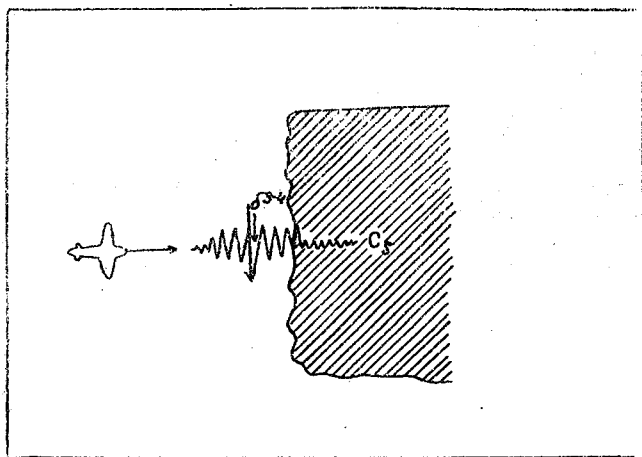


Рис. 16. Болтанка у «стен» перисто-слоистых облаков.

данного дня вместе с положением холодного фронта. Мы видим, что линии холодного фронта у поверхности земли соответствовала передняя часть высотной ложбины с дивергирующими изогипсами и изотермами, в области которых и наблюдались грозы. Наиболее отчетливо дивергенция была выражена в направлении от Великих Лук к Москве, где скорость ветра соответственно уменьшалась от 100 до 30 км/час. Очевидно, именно здесь, в районе Москвы, имели

место наиболее интенсивные восходящие движения, способствовавшие, судя по количеству выпавших осадков (рис. 18), наиболее активному развитию облаков Сб, по сравнению с другими районами в зоне холодного фронта.

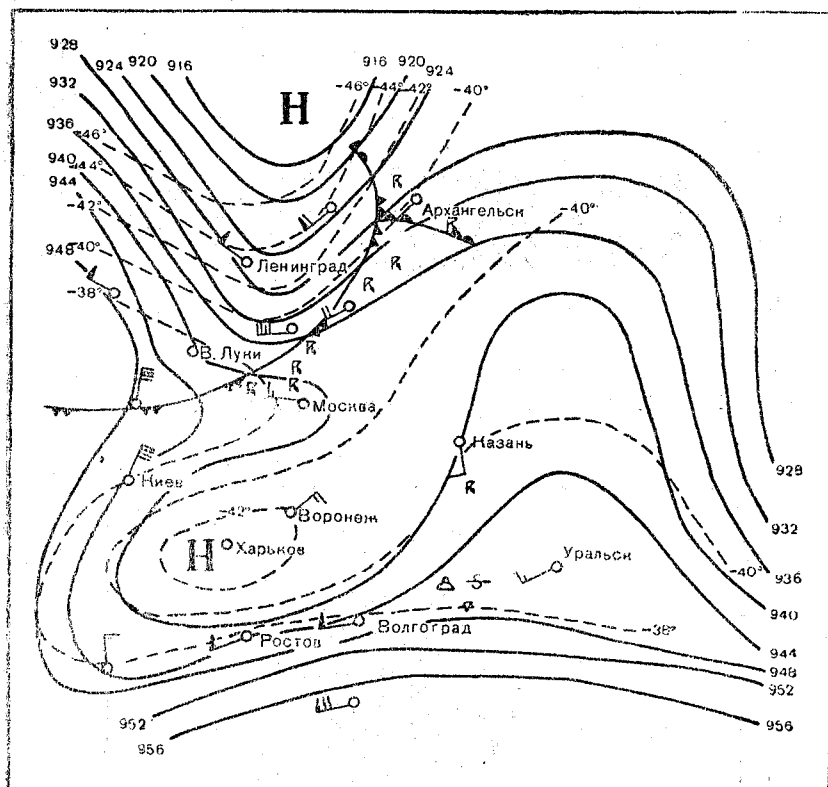


Рис. 17. Карта АТ₃₀₀, 15 час. 8 августа 1959 г. Грозы в зоне высотной дивергенции.

Мы не располагаем какими-либо сведениями об условиях полета в верхних слоях тропосферы в этот день. Имеются лишь данные самолетного зондирования атмосферы во Внуково в 16 час., т. е. до наступления грозы. При зондировании было отмечено на различных уровнях до 4,8 км небольшое количество облаков Ас и в стороне от самолета Си сопг и Сб с верхней границей 5—7 км, над самолетом Сс 10 баллов. Высота тропопаузы по данным радиозондирования в 15 час. была равна 11 км. Можно предположить поэтому, что в момент грозы облака Сб достигали 10—11 км. Желая проверить, можно ли было предвидеть грозу, а следовательно, и болтанку, по данным радиозондирования в этот день, нами были подсчитаны числа Ричардсона по наблюдениям в Долгопрудном в

3, 9 и 15 час. Оказалось, что во все сроки и во всем прозондированном слое атмосферы преобладали значения $Ri > 10,0$, что не давало никаких указаний на возможность грозы в этот день. Это еще

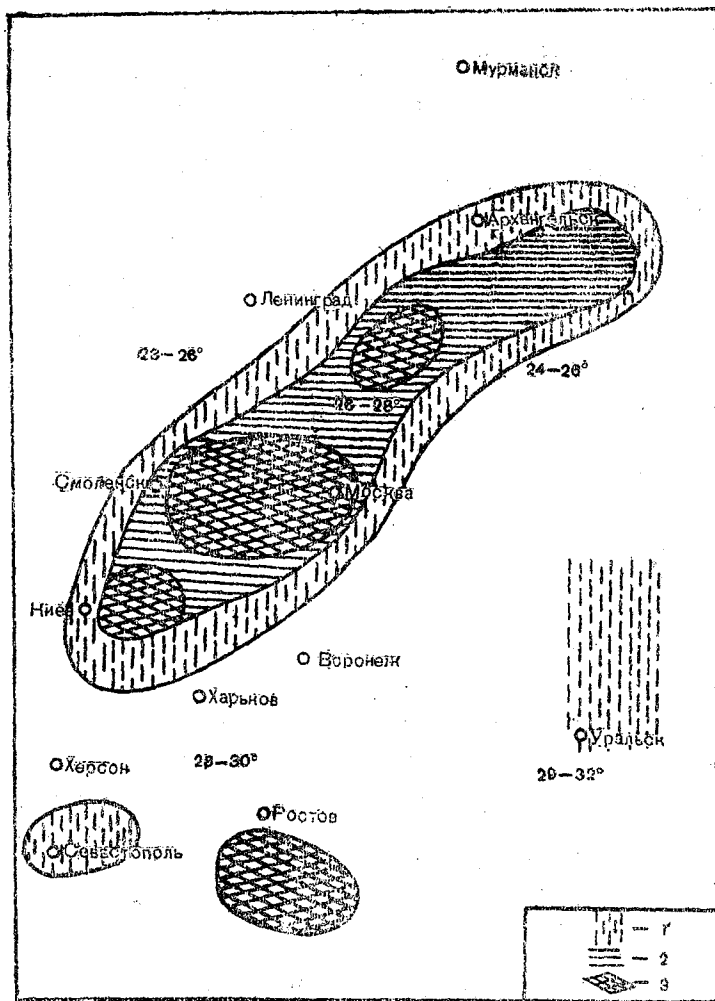


Рис. 18. Карта осадков, 8 августа 1959 г. 1 — от 1 до 4 мм, 2 — от 5 до 10 мм, 3 — больше 10 мм.

лишний раз говорит о необходимости для прогнозиста учитывать главным образом эволюцию и скорость смещения барических образований над достаточно обширной территорией.

Отметим некоторые другие особенности процессов данного дня. Как видно на рис. 17, южные районы еще находились под влиянием

высотной ложбины с центром очага холода между Харьковом и Воронежем. Однако гроз и ливней здесь в этот день не было вследствие отсутствия высотных дивергентных воздушных течений в этом районе.

С другой стороны, по структуре барического и термического высотных полей над Нижней Волгой следовало бы ожидать образование гроз и ливней в районе между Волгоградом и Уральском. В действительности, некоторые станции в этом районе отметили Сб, пыльные бури и слабые ливни; но сильных гроз и ливней здесь все же не было, что можно объяснить очень небольшой влажностью воздуха в данном районе. Однако с большой уверенностью можно сказать, что в случае полета в верхних слоях тропосферы здесь была бы отмечена болтанка.

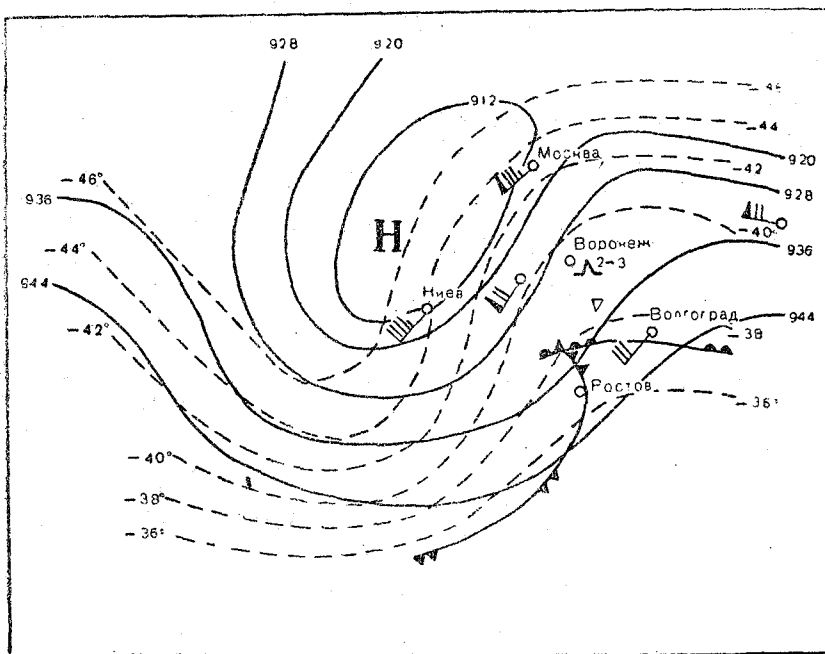


Рис. 19. Карта АТ₃₀₀, 3 часа 2 сентября 1959 г. Болтанка в зоне теплого фронта.

Пример 3. Данный случай уже изучался и был описан М. И. Городовой [2]. Сейчас представляло интерес проанализировать его с точки зрения тех положений, которые излагаются в настоящей работе. Обстоятельства полета заключались в следующем.

Самолет ИЛ-18 вылетел из Москвы 2 сентября 1959 г. в 8 час. 30 мин. в направлении на Ростов-на-Дону. До Воронежа полет происходил в струйном течении, где скорость ветра достигала

160 км/час. Полет проходил спокойно. На полпути до Воронежа самолет вошел в облака, что заставило летчика набрать высоту 10 км и продолжать полет на этой высоте в тонких перистых облаках. В районе Панино, в 50 км к востоку от Воронежа, самолет подняло с 10 до 11 км; затем последовали броски, сначала с 11 до 7 км, затем с 7 до 4 км. Все это произошло в течение 3 минут.

Предполагалось, и это было совершенно правильно, что данное явление было вызвано попаданием самолета в верхнюю часть замаскированного облака Сб, в котором господствовали сильные вертикальные движения. Подтверждением этого было то, что некоторые станции отмечали в данном районе ливневые осадки, а также грозы.

Если теперь сопоставить условия погоды по трассе с аэросиноптическим положением (рис. 19), то мы находим полную аналогию рассматриваемого случая с описанными выше примерами. Неблагоприятные условия погоды для полета начались в тот момент, когда самолет вышел из области наибольших горизонтальных градиентов геопотенциала и температуры и попал в область, где эти градиенты значительно уменьшились. При этом район между Воронежем и Ростовом, где выпадали значительные осадки, сопровождавшиеся местами грозами, находился под зоной дивергенции воздушных течений на уровне 300 мб.

При описании данного случая Городовой главный упор делался на то, что эти условия погоды были связаны с проявлением влажнонеустойчивой стратификации воздуха. Считалось, что такими особенностями отличалась теплая воздушная масса, скользящая вверх по поверхности теплого фронта. Эти доводы были достаточно обоснованными. Но можно предположить, что дополнительным фактором, способствовавшим проявлению неустойчивости, были вертикальные движения в верхних слоях тропосферы, возникшие в зоне дивергенции воздушных течений на этих высотах.

Следует также подчеркнуть, что эти условия погоды наблюдались на антициклонической стороне струйного течения.

Глава IV

ТИПИЧНЫЕ СЛУЧАИ БОЛТАНКИ И ОСОБЕННОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЕЕ В ЗОНЕ ТРОПОПАУЗЫ И НИЖНЕЙ СТРАТОСФЕРЕ

1. Типичные случаи болтанки

Рассмотрим несколько случаев болтанки, иллюстрирующих аэросиноптические процессы, типичные для возникновения этого явления при ясном небе.

Пример 1. За день 10 октября 1959 г. поступило 5 сообщений о метеорологических условиях полета самолета ТУ-104 по трассе Москва — Иркутск.

В одном из полетов участвовал синоптик Центрального института прогнозов А. А. Павловская. При полете из Москвы в Омск в период с 23 час. 9 октября до 3 час. 10 октября на высоте 8 км она отметила очень слабую болтанку местами на участке Москва—Казань и довольно ощутимую болтанку (умеренную) в районе Петропавловска (восточнее Кургана). Как видно на рис. 20, на участке Москва — Свердловск полет происходил в тыловой части высотного циклона при относительно слабых северных ветрах (40—70 км/час). Тот сдвиг ветра, который наблюдался в самом начале маршрута (в районе Москвы), не обусловил заметной турбулентности, так как самолет, набирая высоту, проходил здесь на небольшой высоте. Ощутимая болтанка началась лишь тогда, когда самолет пересек ось ложбины в районе Свердловска и приблизился непосредственно к зоне струйного течения в передней части этой ложбины. Здесь ветер резко изменил свое направление и усилился до 140—160 км/час, по сообщениям же некоторых летчиков скорость ветра доходила до 180 км/час. Средний горизонтальный градиент скорости ветра на участке Свердловск — Петропавловск ориентировочно составлял 20—25 км/час на 100 км. Но совершенно очевидно, что на каком-то очень небольшом участке этот градиент был значительно больше.

Болтанка продолжалась 11 мин., что соответствует ширине турбулентной зоны 120—140 км. Далее до Омска болтанки не было, хотя полет продолжался в зоне струйного течения. Эта болтанка

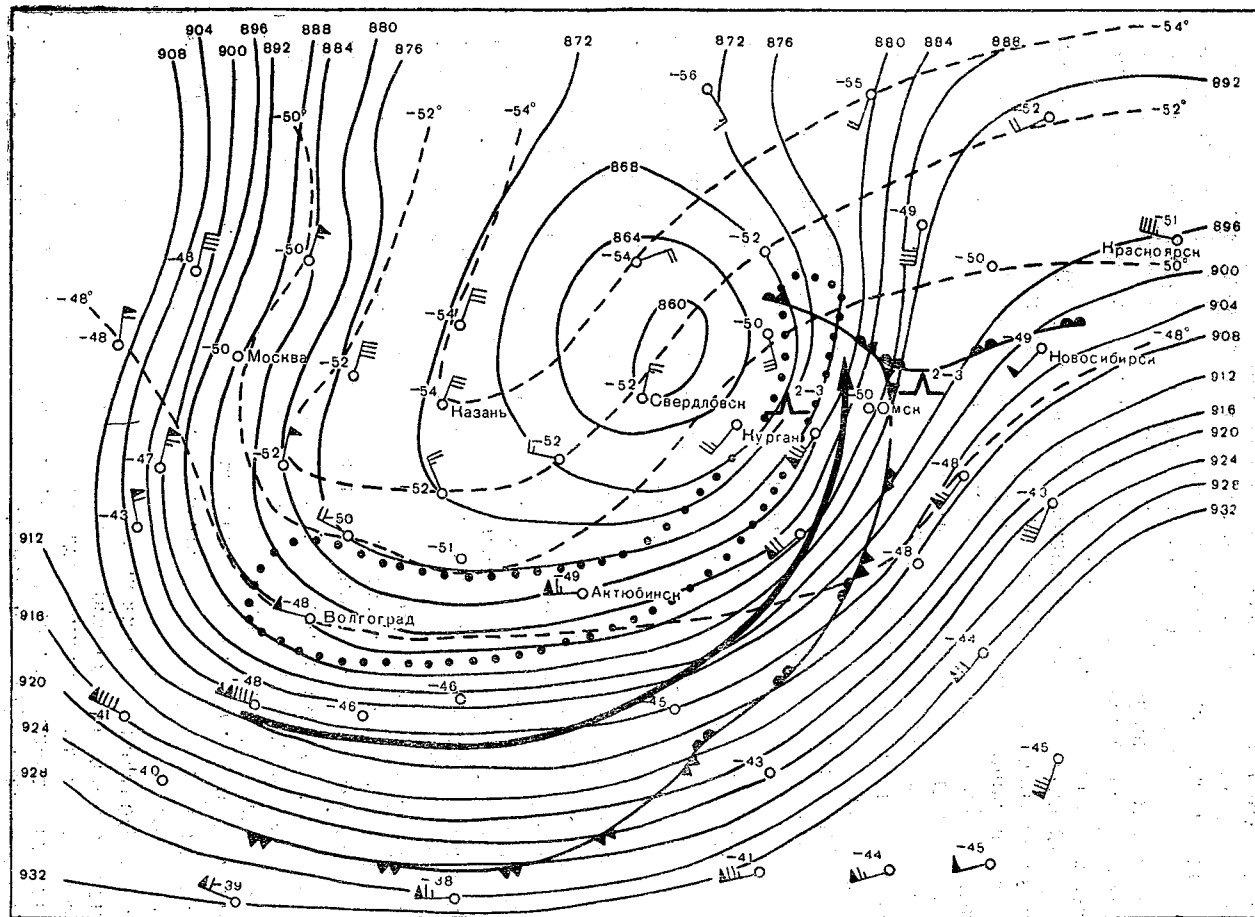


Рис. 20. Карта AT₃₀₀, 3 часа 10 октября 1959 г. Болтанка на участке Курган—Новосибирск.

была отмечена летчиками как умеренная, хотя, по мнению синоптика Павловской, болтанка была сильной. Другие летчики, пролетавшие в этой зоне струйного течения между 10 и 14 часами 10 октября на эшелоне 9 км отметили также умеренную и сильную болтанку. Но в связи со смещением высотного циклона и, следовательно, струйного течения к востоку соответствующая зона болтанки была отмечена восточнее Омска.

Как видно на представленной схеме (рис. 20) и вертикальном разрезе (рис. 21), струйное течение было связано с высотной фронтальной зоной, которой у поверхности земли соответствовал арктический фронт. Холодный участок этого фронта, пересекая трассу Свердловск—Новосибирск, смещался с запада на восток. Таким образом, указанная зона болтанки располагалась за холодным фронтом на циклонической окраине струйного течения при боковом сдвиге ветра.

Вторая зона болтанки располагалась перед холодным фронтом, в теплом секторе. Существование этой зоны подтвердилось сведениями двух пилотов, совершавших полет утром в направлении Иркутск—Омск на эшелоне 9 км. На участке Новосибирск—Барабинск оба летчика отметили у верхней кромки C_i и C_s болтанку, которая, по их оценке, была умеренной и сильной. Район болтанки находился вблизи точки окклюзии и совпадал с зоной дивергенции изогипс и изотерм на уровне 300 мб при ясно выраженной антициклонической их кривизне. Здесь имелся горизонтальный сдвиг ветра по потоку, количественную характеристику которого трудно дать из-за недостаточности данных о ветре. Однако в более поздние часы эта вторая зона болтанки исчезла вследствие «выпрямления» изогипс перед холодным фронтом, что в свою очередь было связано с дальнейшим окклюдированием циклона на рассматриваемом участке трассы. Отметим некоторые важные детали, показанные на вертикальном разрезе (рис. 21).

1) Справа от вертикальных линий, проведенных над соответствующими пунктами зондирования атмосферы, проставлены значения β (в знаменателе) и Ri (в числителе), кроме Омска, где отсутствовали данные о ветре выше 6 км. Судя по этим данным, болтанка должна быть наиболее вероятна в районе Барабинска в слое начиная от 9 км, где наблюдалось резкое изменение числа Ri от значения $>15,0$ до 2,2, и соответственно изменение β от 0,0 до 1,0 м/сек на 100 м.

2) Болтанка на циклонической стороне струйного течения отмечена как под тропопаузой, так и над тропопаузой — в зоне бокового сдвига ветра. Можно предположить, что зона болтанки над тропопаузой связана также и с резким изменением вертикальных градиентов ветра. При этом наибольшие вертикальные градиенты ветра сосредоточены в области наибольшего наклона тропопаузы, особенно вблизи гребня волны тропопаузы.

3) Болтанка наблюдалась также на антициклонической стороне

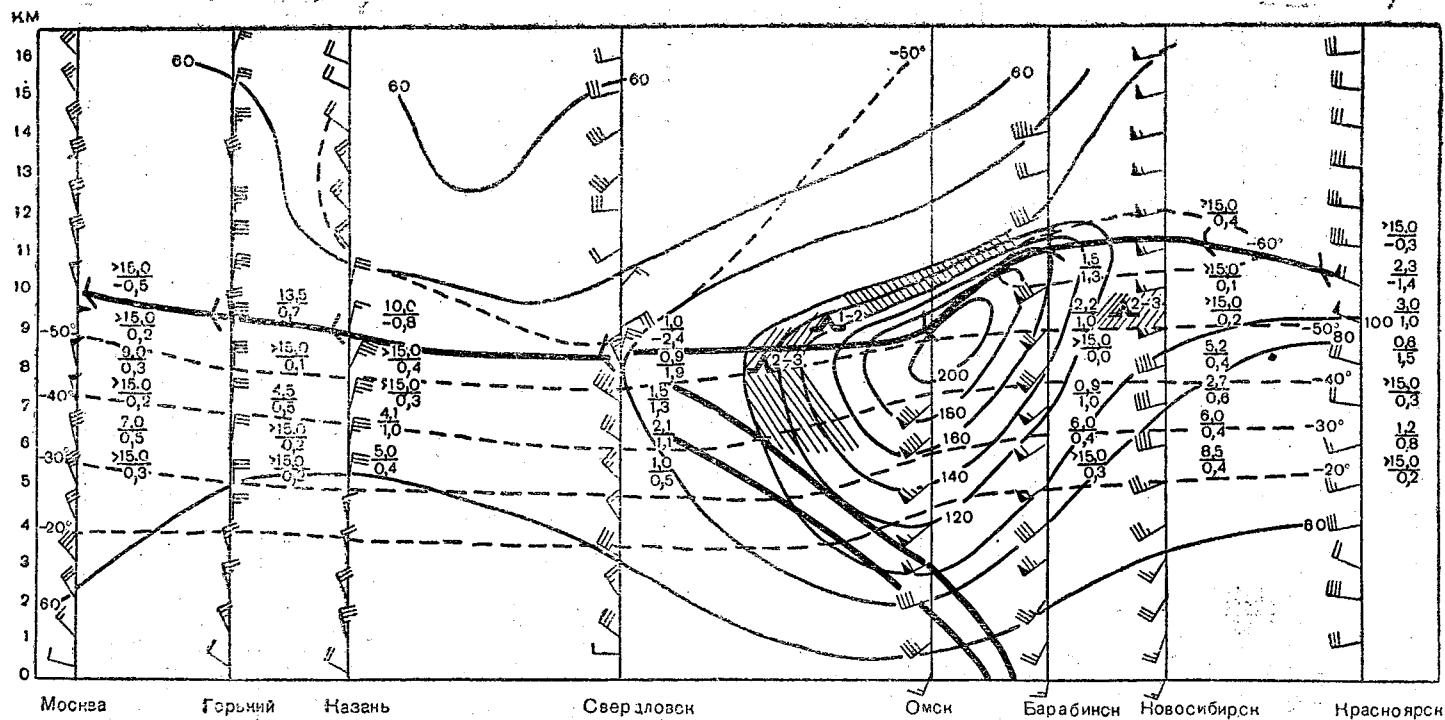


Рис. 21. Вертикальный разрез атмосферы по трассе Москва—Красноярск, 3 часа 10 октября 1959 г.

струйного течения, что, вообще говоря, бывает значительно реже, чем в левой части струйного течения. Это связано с тем, что данный район находился в области дивергенции высотных воздушных течений, характеризовавшейся горизонтальным сдвигом ветра по потоку. Только в этих случаях и возможна умеренная или сильная болтанка на антициклонической стороне струйного течения.

Пример 2. Полет Ленинград — Москва 27 февраля 1960 г. от 12 час. 40 мин. до 13 час. 45 мин. В полете участвовал инженер-синоптик Центрального института прогнозов Ю. К. Федоров.

Данный пример иллюстрирует условия возникновения интенсивной болтанки под влиянием горизонтального сдвига ветра по потоку, при отсутствии облаков вблизи уровня полета. Состояние погоды по маршруту определялось в этот день областью повышенного давления, образовавшейся в холодном воздухе между циклонами над Западной Европой и над южной половиной Европейской территории СССР (рис. 22). Облака типа Sc и Ac располагались лишь в нижней половине тропосферы. Из анализа данных, представленных на карте АТ₃₀₀ по наблюдениям в 15 час. 27 февраля (рис. 8), видно, что маршрут полета находится на восточной периферии струйного течения, проходившего от Атлантики через Скандинавию и Ботнический залив. Над Финляндией произошло ветвление этого струйного течения: одна его ветвь, более сильная, направилась к югу; вторая, более слабая — к востоку. Воздушная трасса Ленинград — Москва находилась в зоне расходимости указанных воздушных течений. В направлении от Ленинграда к Москве происходило значительное ослабление ветра.

Болтанка началась при выходе на эшелон полета на высоте 8 км, на расстоянии около 250 км к востоку от Ленинграда. Сначала была отмечена два раза слабая болтанка; продолжительность первого случая болтанки 10—15 сек., второго — около 1 мин. Затем на протяжении 7 минут полета (около 100 км по расстоянию) болтанка значительно усилилась и стала проявляться в виде отдельных бросков, толчков и тряски; в последующие 3 минуты болтанка стала ослабевать и затем прекратилась. Общая протяженность возмущенной зоны (с учетом начала слабой болтанки и времени ее прекращения) составляла около 220 км.

На рис. 23 представлен вертикальный разрез атмосферы по трассе по наблюдениям в 15 час., причем для большей детализации были использованы данные радиозондирования станций Ленинград и Бологое в 9 час. Таким образом, по этим данным можно судить о том, какие изменения происходили в состоянии атмосферы от одного срока к другому и каково оно было в момент, близкий ко времени полета. Как и в предыдущем случае, справа от вертикальных линий выписаны значения R_i и β .

Наибольший интерес представляют для нас данные станции Бологое, поскольку они непосредственно характеризуют состояние атмосферы над тем районом, где наблюдалась болтанка, хотя раз-

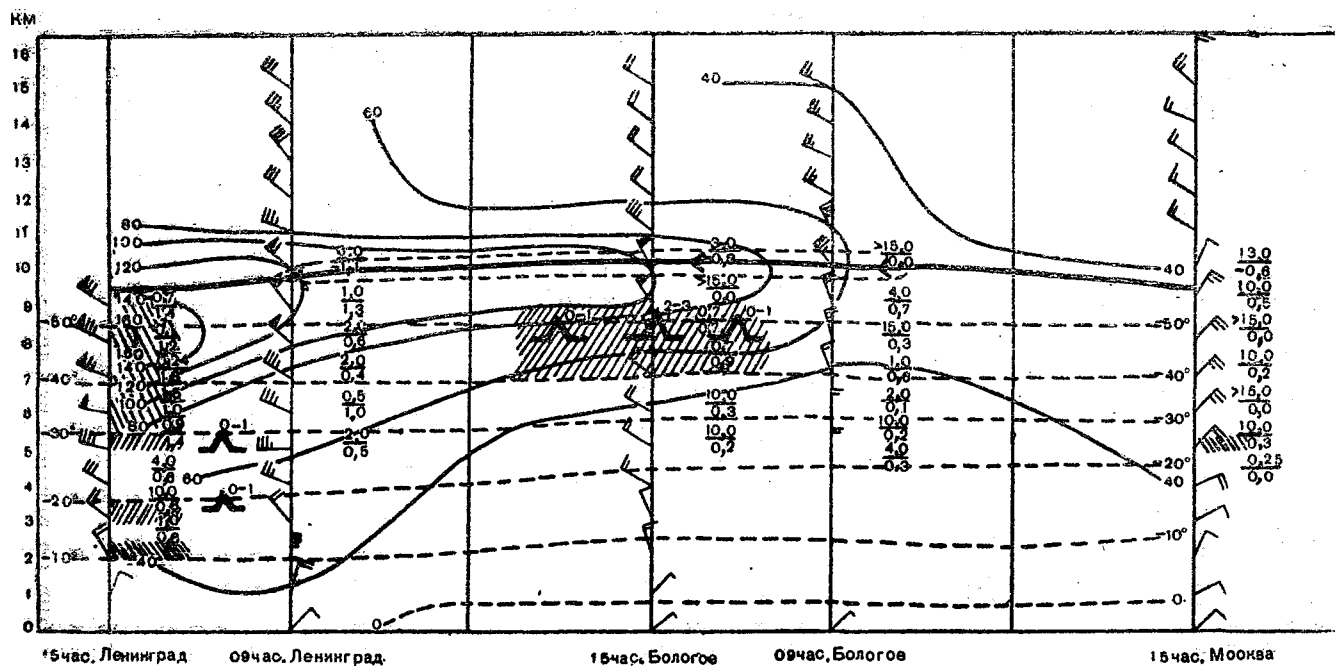


Рис. 23: Вертикальный разрез атмосферы по трассе Ленинград—Москва, 15 час. 27 февраля 1960 г.

ница в сроках наблюдений составляет около 1 часа 30 мин. Дополнительно к вертикальному разрезу на рис. 24 показано изменение кривых стратификации для станции Бологое. Судя по изменению скорости ветра на различных высотах, мы замечаем, что над станцией Бологое в период от 9 до 15 час. на высотах 10,9 и 8 км произошло заметное усиление ветра (рис. 23) при небольшом повышении температуры в верхней половине тропосферы (рис. 24). На меньших же высотах это усиление ветра было незначительным. Следовательно, увеличение вертикального сдвига ветра должно

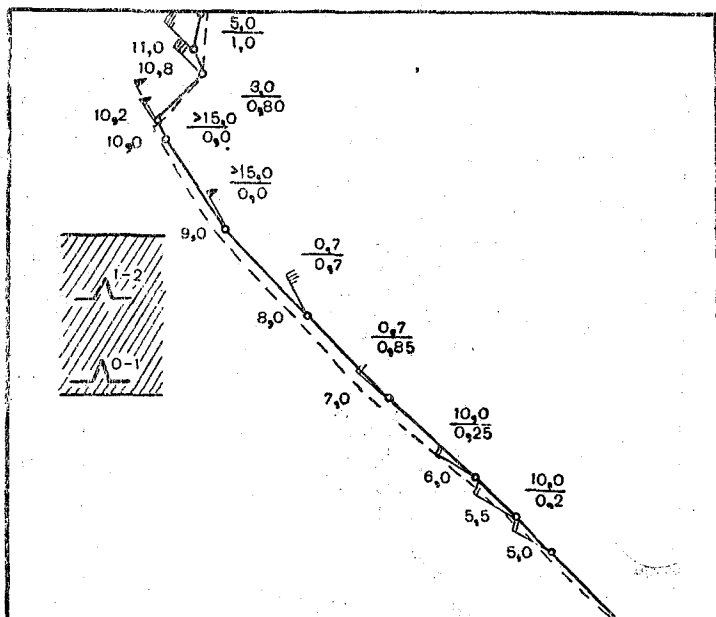


Рис. 24. Изменения вертикального распределения температуры от 9 до 15 час. над станцией Бологое и распределение Ri и β 27 февраля 1960 г.

было привести к повышению уровня турбулентной энергии, что мы и видим по уменьшению значений чисел Ri для слоев 7—8 и 8—9 км. Но как ниже 7 км, так и выше 9 км значения Ri резко возросли, соответственно здесь наблюдались и значительные изменения β , что в общей сложности является хорошим признаком наличия турбулентности в рассматриваемом слое 7—9 км. Этого нельзя, однако, сказать в отношении данных для Москвы и Ленинграда. Несмотря на критические значения чисел Ri для ряда слоев верхней половины тропосферы, болтанка при наборе высоты в Ленинграде и при спуске в районе Москвы не наблюдалась.

В этот же день и почти в такое же время совершался полет из Москвы в Ленинград на высоте 7 км, при котором в районе Бологое в течение 7—8 мин. отмечалась лишь слабая болтанка. Таким образом, учитывая, что значение R_i для слоя 9—10 км составляло $>15,0$ (а это указывает на очень низкий уровень турбулентной энергии), можно сказать, что толщина всего слоя с болтанкой составляет около 2 км и что зона болтанки в данном случае не распространялась до тропопаузы.

В тот же день совершался полет из Москвы в Ташкент с участием проф. В. А. Бугаева. На протяжении большей части маршрута с небольшими перерывами наблюдалась слабая болтанка. Только в самом конце полета, т. е. при подходе к Ташкенту, болтанка стала переходить в умеренную. Из анализа карты АТ₃₀₀ (рис. 8) видно, что зоны болтанки располагались в передних частях высотных ложбин с слабо дивергирующими изогипсами.

Важно также отметить, что в самом начале маршрута, на участке Москва — Тамбов, полет совершался через ось ложбины, вдоль которой наблюдался резко выраженный сдвиг ветра, т. е. переход от северо-восточного на юго-западное направление. Болтанки, однако, здесь не было. Это объясняется тем, что сдвиг выражался только в изменении направления ветра, тогда как его скорость была почти одинаковой по одну и другую сторону оси ложбины и составляла всего лишь 50—60 км/час, что совершенно недостаточно для возникновения зон повышенной турбулентности.

Пример 3. Полет Москва — Свердловск 26 июля 1960 г. от 13 час. 37 мин. до 15 час. 30 мин. В полете участвовал аспирант Центрального института прогнозов Б. Е. Песков.

Предыдущие два примера относились к таким синоптическим процессам, которые перемещались в направлении, совпадавшем с обычным направлением воздушной трассы, в данном случае с запада на восток. В этих случаях вертикальные разрезы атмосферы, построенные по последним информационным данным, могут оказать непосредственную помощь при составлении прогноза, так как они не только отражают фактическое состояние погоды по трассе, но в известной мере отражают и происходящие ее изменения в связи с перемещением различных барических образований с запада на восток. Другое дело, когда на всем протяжении трассы либо на каком-то отдельном ее участке состояние погоды находится в зависимости от процессов, развивающихся в стороне от трассы, в направлении, составляющем с нею достаточно большой угол. В этих случаях вертикальный разрез атмосферы по трассе плохо отражает эволюцию тех процессов, которые влияют на изменение погоды по трассе. Если при этом рассматривать вертикальный разрез атмосферы без подробного анализа процессов, происходящих в стороне от трассы, то можно прийти к грубым просчетам в диагнозе погоды, не говоря уже о прогнозе. Рассматриваемый пример относится именно к такому случаю.

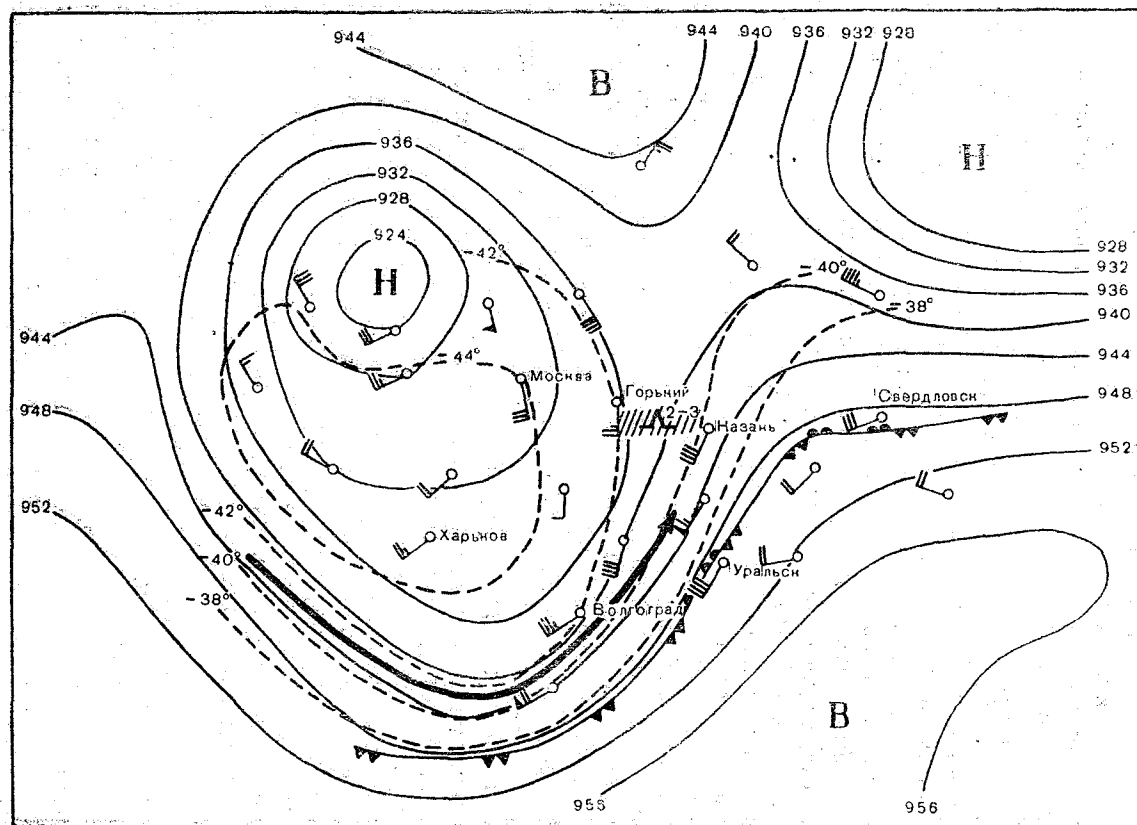


Рис. 26. Карта AT_{300} , 15 час. 26 июня 1960 г. Болтанка в районе Горький—Казань.

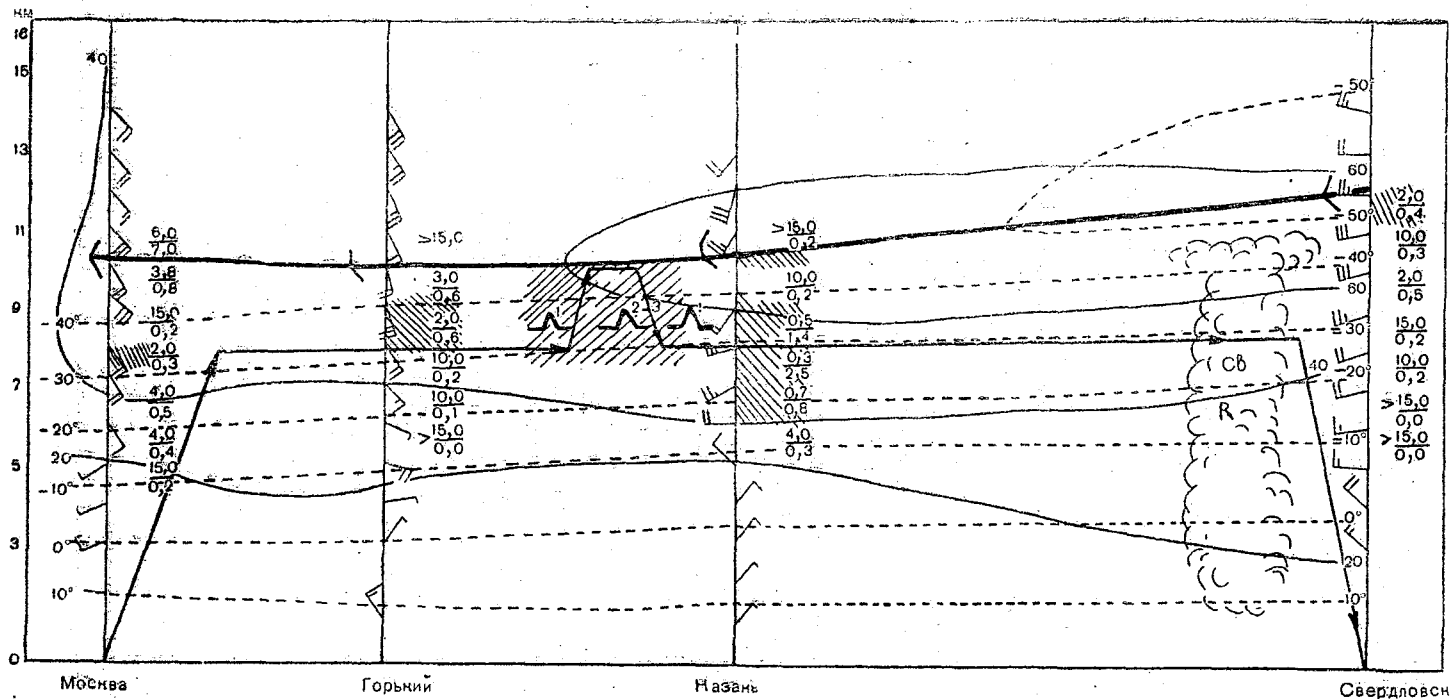


Рис. 27. Вертикальный разрез атмосферы по трассе Москва—Свердловск, 15 час. 26 июня 1960 г.

В районе Горького, на высоте 9,9 км (в зоне тропопаузы), в 14 час. 10 мин. началась слабая болтанка. Через 7 мин., на расстоянии 100 км от Канаша, болтанка перешла в сильную. Чтобы ослабить болтанку, летчику пришлось снижаться, но как при снижении, так и при полете на новом эшелоне болтанка продолжалась в виде сильной тряски и отдельных очень резких бросков. И лишь на высоте 8,2 км, при подходе к Казани, болтанка ослабела и далее до Свердловска отсутствовала. Ширина зоны наиболее интенсивной болтанки составила около 100 км, а ширина всей возмущенной зоны, исключая слабую болтанку в районе Горького, была равна примерно 250 км. С борта самолета, проходившего на высоте 9 км в обратном направлении, также сообщалось о сильной болтанке. Болтанка наблюдалась в безоблачном пространстве, хотя местами на высоте 10—11 км, а также на высоте 8,5 км отмечались облака типа Cs и беспокойные, но почти прозрачные облака типа перистых перепутанных. Основные массивы облаков Sc—Ac располагались в этом районе на высотах 2—3 км. От Казани количество облаков и их вертикальная мощность стали увеличиваться, и к концу маршрута облака перешли в Cb с грозами. Эти облака располагались в основном справа от трассы и на полет никакого влияния не оказали.

С внешней стороны состояние погоды не внушало каких-либо опасений. Из анализа синоптической карты (рис. 25) видно, что условия погоды по трассе определялись тыловой частью депрессии, с центром несколько южнее Свердловска. Однако тыл был очень «вялый» с преобладанием слабых ветров и с барическими тенденциями около 0,0 или слабо отрицательными. Скорость ветра по всему маршруту на высотах 8—10 км составляла всего лишь 40—60 км/час. Тропопауза по всему маршруту также не испытывала каких-либо заметных изменений. Между тем карта АТ₃₀₀ (рис. 26) вполне объясняет образование зоны интенсивной болтанки между Горьким и Казанью. Эта зона совпадает с дельтой фронтальной зоны, ориентированной с юго-запада на северо-восток. Максимальные скорости ветра в струйном течении достигали 250 км/час.

На что можно было бы обратить внимание в данном случае при рассмотрении вертикального разреза (рис. 27), так это на антициклоническое изменение направления ветра между Горьким и Казанью, а также на распределение значений R_i и β над Казанью в слое 6—9 км. Учет обоих факторов был бы полезен при определении зоны возможной болтанки.

2. Особенности возникновения болтанки в зоне тропопаузы и нижней стратосфере

В табл. 8 приводились данные, указывающие, что болтанка может наблюдаться и в нижних слоях стратосферы. К соответствующим случаям мы относили все те случаи, когда полеты происходили на уровнях выше нижней границы тропопаузы. Следовательно,

сюда вошли случаи, когда болтанка отмечалась в зоне тропопаузы, а также непосредственно в стратосфере.

При рассмотрении условий возникновения болтанки в зоне тропопаузы Н. З. Пинус [16] высказывает предположение, что главным источником турбулентности являются в этом случае неустойчивые гравитационные волны, которые могут наблюдаться в зоне тропопаузы. Тропопауза при этом рассматривается как поверхность, разделяющая две движущиеся жидкости разной плотности, вдоль которой некоторые процессы могут создавать бегущую гравитационную волну. В результате вырождения и распада этих волн на сравнительно мелкие вихри может возникнуть турбулентность, соизмеримая с размерами самолета. Приблизительно такого же мнения придерживается и А. П. Юргенсон. Он считает, что те случаи болтанки, которые встречаются в зоне тропопаузы при больших значениях числа Ричардсона, обусловлены не турбулентным состоянием данного слоя атмосферы, а влиянием волн тропопаузы.

О характере самой болтанки (ее интенсивности и продолжительности) в зоне тропопаузы мы можем судить в данной работе главным образом по наблюдениям синоптиков. Вот пример записи синоптика Центрального института прогнозов Н. Ф. Вельтищева, совершавшего полет по трассе Москва — Новосибирск 29 февраля 1960 г. в зоне тропопаузы:

«14 час. 12 мин., район Горького. Дымка, горизонт виден плохо; слабая болтанка в течение 1 мин.

14 час. 33 мин. Слабая болтанка несколько секунд; полет чуть выше верхней кромки облаков.

14 час. 53 мин., район Янаула. Слабая болтанка в виде отдельных толчков через несколько секунд.

14 час. 55 мин. Слабая болтанка несколько секунд, потом через 1 мин. снова.

14 час. 56 мин. Слабая болтанка 2 мин.

15 час. 02 мин. — 15 час. 07 мин. Слабая болтанка в течение 5 мин.

15 час. 32 мин., район Свердловска (Кольцево). Слабая болтанка несколько секунд.

15 час. 45 мин., район Кургана. Слабая болтанка в течение 1,5 мин.

16 час. 08 мин., район Петропавловска. Слабая болтанка 1 мин.».

Высота тропопаузы в данном случае не испытывала существенных колебаний по трассе. При этом общие аэросиноптические условия не представляли собой что-либо характерное для возникновения болтанки. Как мы видим, по всему маршруту болтанка была слабой; летчики обычно не сообщают о такой болтанке. В ее появлении не видно строгой закономерности, но надо полагать, что непосредственной причиной болтанки были гравитационные волны, возникавшие на поверхности тропопаузы.

Более определенные выводы, очевидно, можно было бы получить путем анализа отдельных случаев специального самолетного

зондирования атмосферы. Но таких случаев у нас почти не оказалось. Пришлось ограничиться лишь данными 25 случаев болтанки при оперативном зондировании атмосферы. Из них в 10 случаях болтанка наблюдалась непосредственно под нижней границей тропопаузы. При этом в 5 случаях толщина слоя болтанки колебалась в пределах от 200 до 500 м и в 5 случаях летчики ограничились указанием только одного уровня с болтанкой, находившегося вблизи нижней границы тропопаузы. Во всех случаях тропопауза была выражена достаточно четко, в виде инверсии или изотермии. По интенсивности болтанки эти 10 случаев распределялись следующим образом: слабая — 1, умеренная — 6 и сильная — 3.

В 15 случаях болтанка была отмечена выше уровня нижней границы тропопаузы на расстоянии от этого уровня от 200 до 5000 м. Будем считать эти случаи как болтанку в нижней стратосфере. В 11 случаях толщина слоя болтанки составляла от 200 до 1200 м, в 4 случаях указывалась высота лишь одного уровня болтанки. В 5 случаях (33%) болтанка была слабой, в 4 случаях (27%) — умеренной и в 6 случаях (40%) — сильной.

Приведенные данные хотя и отражают известную выборочность использованного материала, но все же свидетельствуют о том, что и в нижних слоях стратосферы турбулентность иногда достигает такого уровня, когда она может вызвать опасную болтанку самолетов. В целях исследования причин возникновения болтанки самолетов в указанных слоях атмосферы нами подсчитывались, когда это было возможно, числа Ri , сопоставлялись кривые стратификации атмосферы от одного срока наблюдений к другому (через 12 часов) и анализировались соответствующие аэросиноптические положения. Подсчет чисел Ri производился как для слоя, в котором отмечалась болтанка, так и для ниже лежащего слоя. Кроме этого, для некоторых, наиболее характерных случаев подсчитывались вертикальные движения для основных уровней тропосферы (850, 700, 500, 300 мб) и для уровня 200 мб, находившегося в зоне тропопаузы или нижней стратосфере. Расчет вертикальных движений производился по полю ветра в соответствии с методикой, предложенной Е. М. Орловой [11].

В результате были выявлены следующие характерные особенности.

1. Болтанка в зоне тропопаузы и нижней стратосфере наблюдается прежде всего в тех случаях, когда этому благоприятствуют общие аэросиноптические условия, рассмотренные выше. По-прежнему здесь главную роль играют дивергенция воздушных течений, вертикальные и горизонтальные сдвиги ветра.

2. В 22 случаях из 25 (88%) болтанка в зоне тропопаузы и в стратосфере наблюдалась в тех случаях, когда за прошедшие 6—12 час. произошло понижение температуры. В свою очередь это понижение было связано с повышением температуры в тропосфере вследствие адвекции теплого воздуха. В остальных 3 случаях

(12%) температура в зоне тропопаузы и в стратосфере повышалась или оставалась без заметных изменений.

3. В тех случаях, когда болтанка наблюдалась непосредственно под нижней границей тропопаузы, значения Ri испытывали резкие изменения, характеризовавшиеся переходом от малых значений (0,2—4,0) под тропопаузой к большим значениям (10,0 и более) над нижней границей тропопаузы. Это свидетельствовало о повышенном уровне турбулентной энергии под тропопаузой, как под задерживающим слоем. Поскольку при этом зона болтанки совпадала со слоем, где происходило понижение температуры во времени, то можно сказать, что в повышении уровня турбулентной энергии играла, очевидно, некоторую роль неустойчивость стратификации атмосферы.

4. При болтанке, отмечавшейся выше нижней границы тропопаузы, числа Ri в слоях, прилегающих к уровню болтанки, как правило, были больше 4,0, однако какой-либо закономерности в их распределении не обнаружилось.

5. Подсчеты вертикальных движений при болтанке на больших высотах показали, что в этих случаях в большей толще тропосферы и нижней стратосфере преобладают восходящие вертикальные движения. Причем во всех случаях заметно резкое возрастание абсолютных значений вертикальных скоростей с высотой, в том числе при переходе из тропосферы в стратосферу.

Для иллюстраций мы приводим данные о вертикальных скоростях, подсчитанных для наиболее характерных случаев болтанки в различных пунктах Европейской территории СССР (табл. 23).

Таблица 23

Значение вертикальных скоростей (см/сек) на уровнях основных изобарических поверхностей при болтанке в зоне тропопаузы и в нижней стратосфере

Уровень (мб)	Петрозаводск	Киев	Куйбышев	Москва
850	1,2	—0,6	—0,9	0,39
700	4,6	0,4	—0,7	—2,0
500	6,4	3,6	0,15	—4,9
300	8,2	22,1	9,0	—17,8
200	14,3	36,6	13,2	—56,7

Примечание. Знак минус означает нисходящее движение, без знака—восходящее.

В табл. 23 данные для первых трех пунктов показывают преобладание восходящих вертикальных движений, которые возрастают с высотой, особенно при переходе от уровня 300 мб к уровню 200 мб. Данные, приведенные в последнем столбце, относятся к одному из сообщенных нам случаев сильной болтанки, имевшему место в районе Казани на высоте 11—12 км 25 марта

1959 г. Аэросиноптическая обстановка, по нашему мнению, неблагоприятствовала возникновению болтанки. Вертикальные движения по подсчетам оказались нисходящими. Поэтому более вероятно, что этот случай болтанки не соответствует действительности.

Необходимо немного остановиться на роли наклона тропопаузы в возникновении болтанки. Существует мнение, согласно которому чем больше наклон тропопаузы, тем вероятнее возникновение опасной болтанки; при наклонах тропопаузы, равных $\frac{1}{100} - \frac{1}{300}$, обычно возникает умеренная и даже сильная болтанка.

В действительности же дело обстоит по-разному. В одних случаях при пересечении тропопаузы с большим наклоном возникает сильная турбулентность, в других случаях пересечение тропопаузы с таким же наклоном вызывает очень слабую турбулентность или полное ее отсутствие; в-третьих, сколько угодно встречается случаев, когда поверхность тропопаузы является квазигоризонтальной, но полет в ее зоне сопровождается опасной болтанкой. Будет или не будет болтанка в зоне тропопаузы — это зависит прежде всего от характера аэросиноптических условий, определяющих состояние погоды по трассе полета.

Предположим, например, что на трассе полета располагается холодный высотный циклон, очерчиваемый несколькими замкнутыми изогипсами, но с приблизительно равными градиентами геопотенциала. Тогда, как было показано на рис. 7, ветры в области такого циклона не имеют значительных сдвигов, хотя они могут быть достаточно сильными, что означает отсутствие необходимых условий для возникновения существенной болтанки. В то же время тропопауза в области данного барического образования обычно круто понижается от периферии к центру, образуя «воронку» тропопаузы. В таких случаях у гребня волны тропопаузы создаются наибольшие горизонтальные градиенты температуры и, следовательно, наиболее сильные ветры. Выше нижней границы тропопаузы, т. е. будем считать в стратосфере, горизонтальные градиенты температуры обычно уменьшаются, иногда очень резко. Вследствие этого над нижней границей тропопаузы создаются довольно заметные горизонтальные и вертикальные сдвиги ветра, что и может послужить причиной умеренной болтанки, но сравнительно небольшого горизонтального и вертикального протяжения. Это было видно на примере 10 октября 1959 г. Кроме того, на рис. 28 дан вертикальный разрез атмосферы по трассе Горький—Москва—Бологое—Ленинград для случая 23 июня 1960 г. (рис. 7). Здесь хорошо видна «воронка» тропопаузы, соответствующая центральной части высотного циклона. Тропопауза особенно круто наклонена на участке Москва—Бологое (наклон $\approx \frac{1}{100}$). В области гребня тропопаузы, над нижней ее границей, наблюдаются заметные горизонтальные и вертикальные сдвиги ветра, что и должно вызвать повышенную турбулентность. Фак-

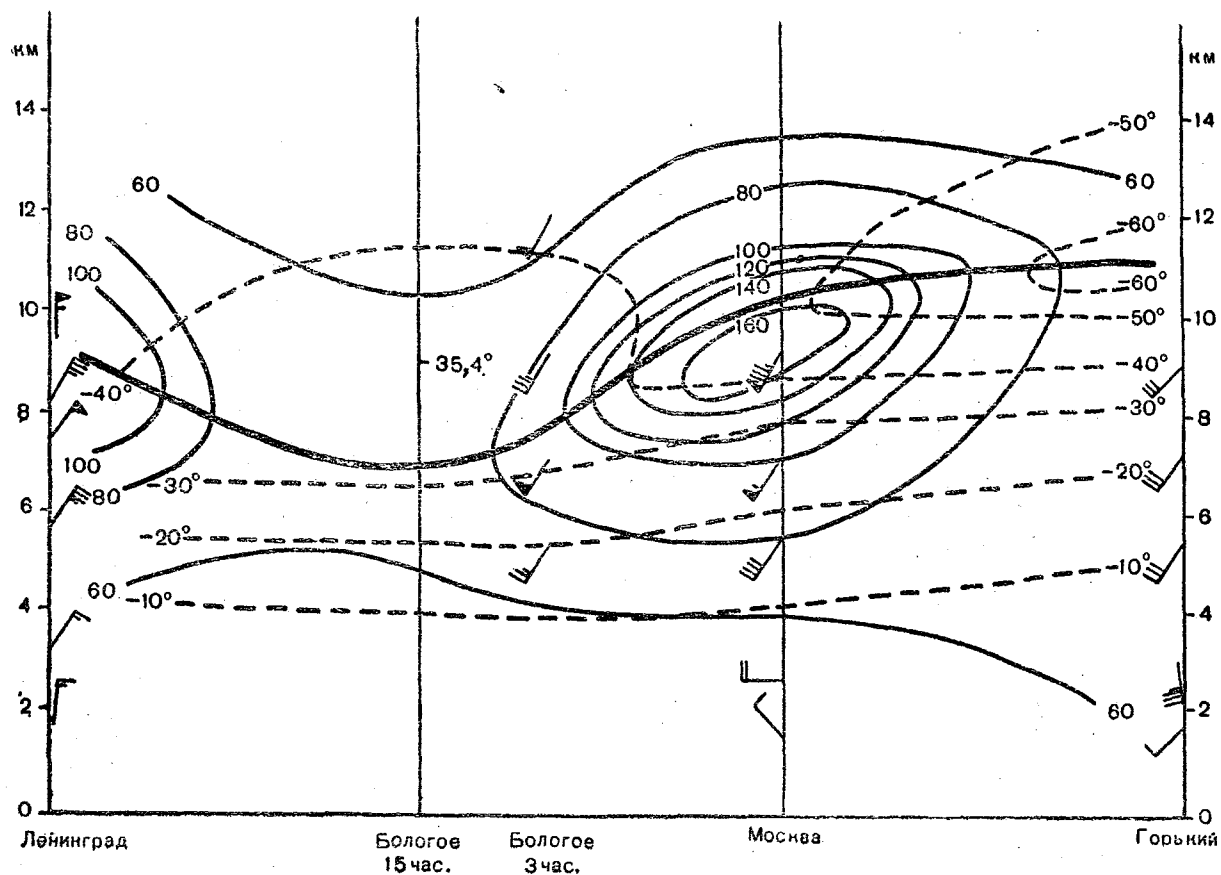


Рис. 28. Изменение высоты тропопаузы в области глубокого высотного циклона; слабая до умеренной болтанка над тропопаузой в зоне горизонтального и вертикального сдвигов ветра.

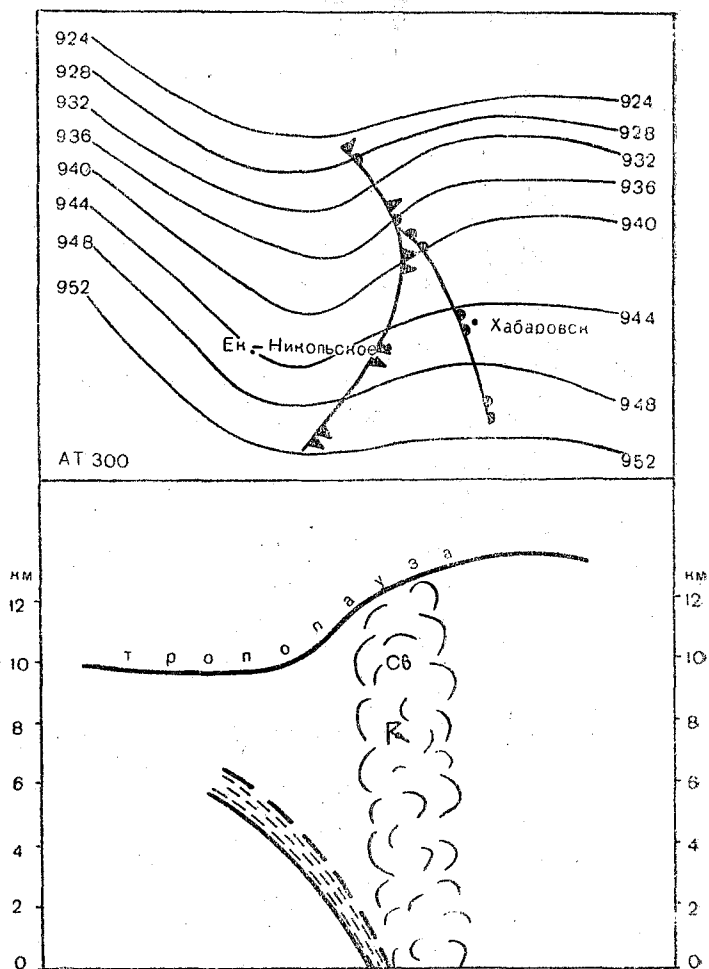


Рис. 29. Изменение высоты тропопаузы в зоне холодного фронта; опасная болтанка при пересечении мощных Сб.

тически была зарегистрирована слабая болтанка между Москвой и Бологое на высоте 8 км.

Более опасные условия возникают при большом наклоне тропопаузы в зоне хорошо выраженного тропосферного холодного фронта, проходящего на фоне дивергенции высотных воздушных течений (рис. 29). Для образующихся в предфронтальном теплом воздухе облаков Сб создаются при данной обстановке, особенно в теплую половину года, весьма благоприятные условия для их активного развития по вертикали, во-первых, вследствие значительных восходящих движений в зоне дивергенции и, во-вторых, вследствие относительно высокого расположения тропопаузы в теплом воздухе. Таким образом, рассматриваемое аэросиноптическое положение, характеризующееся большим наклоном тропопаузы, пред-

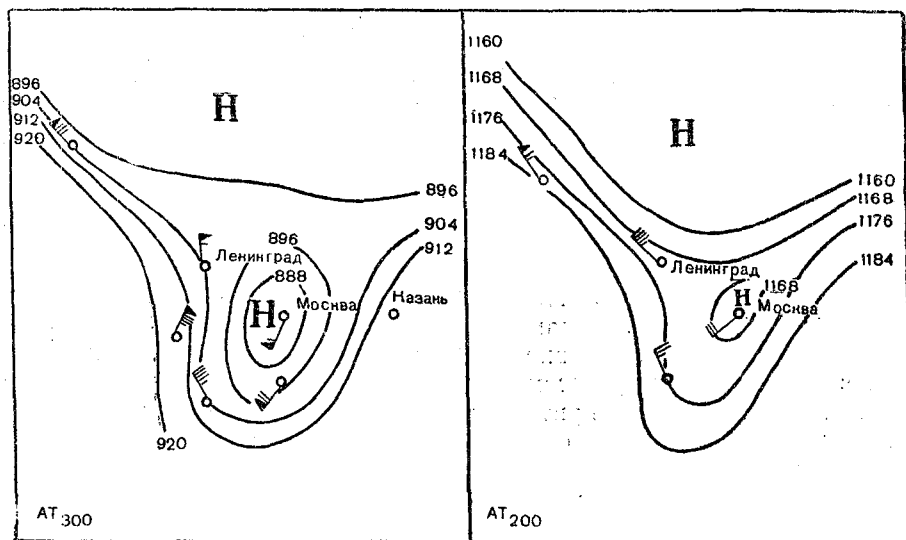


Рис. 30. Карты АТ₃₀₀ и АТ₂₀₀, 3 часа 15 сентября 1959 г. Болтанка в нижней стратосфере.

ставляет очень большую опасность для полетов вследствие возможной встречи с сильно развитыми по вертикали кучево-дождевыми облаками.

В заключение приведем пример возникновения болтанки в нижней стратосфере. 15 сентября 1959 г. около 8 час. в районе Москвы поднимался самолет, который на высоте 10,8 км испытал умеренную болтанку. Высота тропопаузы была около 8 км, следовательно, болтанка наблюдалась в стратосфере. Для характеристики аэросиноптических условий в верхней тропосфере и нижней стратосфере на рис. 30 даны схемы карт АТ₃₀₀ и АТ₂₀₀. Как видно на этом рисунке, метеорологические условия в верхней тропосфере

над центральной частью Европейской территории СССР определялись высотной депрессией в районе Москвы. Депрессия хорошо очерчена и горизонтальные градиенты геопотенциала хотя и были значительные, но распределялись в интересующем нас районе довольно равномерно. Как следует из рассмотренных ранее положений, такая обстановка мало благоприятствует условиям для возникновения болтанки. В нижней стратосфере в это время обстановка отличалась существенными деталями. На уровне 200 мб депрессия была выражена значительно слабее. С северо-западной же стороны надвигалась область расходимости воздушных течений, связанная с дельтой фронтальной зоны, что и определило развитие турбулентности на данном уровне.

3. Некоторые результаты экспериментальных полетов по изучению турбулентности в струйных течениях¹

В мае 1961 г. проводились экспериментальные полеты по изучению турбулентности в струйных течениях на Дальнем Востоке, организованные Центральной аэрологической обсерваторией совместно с ГосНИИ ГВФ.

Одной из задач автора была проверка полученных ранее в Центральном институте прогнозов некоторых положений, относящихся к диагнозу и прогнозу болтанки самолетов в верхних слоях тропосферы. Полеты осуществлялись на двух самолетах-лабораториях (ТУ-104 и ИЛ-18), оборудованных регистрирующими приборами и самописцами. Время проведения экспедиции оказалось, к сожалению, не вполне удачным, так как струйные течения в этот период над рассматриваемой территорией встречались сравнительно редко и притом они были выражены недостаточно отчетливо. Наибольшие скорости ветра, которые встречались в двух экспериментальных полетах, были около 250 км/час. В основном полеты происходили при скоростях ветра до 150—180 км/час. Тем не менее в результате экспедиции был получен ряд интересных результатов.

В течение 15 дней было проведено 28 полетов и во всех этих полетах встречалась болтанка. Если считать за один случай болтанки хотя бы одну отметку об этом явлении на каком-либо участке трассы, то вероятность болтанки в данном случае составила 100%. Однако, если подсчитать вероятность болтанки по другому принципу, например, исходя из соотношения времени полета с болтанкой и общей продолжительности полетов, то значения этой вероятности будут совсем другими (табл. 24).

Общая продолжительность всех полетов во время экспедиции, включая перелеты от Москвы до Хабаровска и обратно, без учета времени, необходимого от взлета до выхода на эшелон и соответственно на посадку, составила 79 часов.

¹ Раздел написан Г. В. Васильевой.

Таблица 24

Распределение времени полета (в часах) с болтанкой и без болтанки при различных скоростях ветра по маршрутам

	Скорость ветра (км/час)			
	<100	100—200	>200	Всего
С болтанкой	7,9	4,8	0,3	13
Без болтанки	44,4	19,1	2,5	6,0
Вероятность болтанки (%)	15	20	11	16

Числа, приведенные в табл. 24, дают представление о том, как часто полеты совершались в струйных течениях. Если к последним отнести скорости ветра, превышающие 100 км/час, то оказывается, что полеты в струйных течениях заняли всего лишь 26,7 часа, т. е. 34% всего времени полетов. Учитывая же общее время полетов при различных скоростях ветра и соответственно время, в течение которого наблюдалась болтанка (табл. 24), мы получаем представление о вероятности болтанки при различных скоростях ветра.

Таблица 25

Повторяемость (в %) различной интенсивности болтанки

Интенсивность болтанки	Скорость ветра (км/час)			Средняя повторяемость
	<100	100—200	>200	
Слабая, до 0,2 g	83	66	88	79
Умеренная, 0,2—0,5 g	17	31	12	20
Сильная, больше 0,5 g	—	3	—	1

Она оказалась наибольшей (20%) при скорости ветра 100—200 км/час и наименьшей (11%) при скоростях ветра больше 200 км/час. Эти данные подтверждают, таким образом, положение, изложенное в главах II и III и заключающееся в том, что нельзя ставить турбулентность в прямую связь со скоростями ветра, как это должно вытекать из критерия Ричардсона.

Заслуживают внимания также данные табл. 25. Они достаточно хорошо подтверждают приводившиеся ранее данные о повторяемости болтанки различной интенсивности. Повторяемость слабой болтанки в среднем составила 79%, умеренной — 20% и сильной — всего лишь 1%. Интересно, что наибольший процент слабой болтанки (88%) приходится на скорости ветра, превышающие 200 км/час.

Для 18 экспериментальных полетов были рассчитаны числа Ричардсона для тех слоев, в которых пролетал самолет над пунктом радиозондирования. При расчетах выполнялись все условия, кото-

рые рекомендуются в работе [4]. Наличие болтанки определялось по акселерографу на самолете.

Таблица 26

Число случаев с болтанкой и без болтанки при различных значениях параметра Ричардсона по данным экспериментальных полетов

	Число Ричардсона				Всего
	0,1—2,0	2,1—4,0	4,1—10,0	>10	
С болтанкой	30	6	3	9	48
Без болтанки	33	3	3	14	53
Вероятность болтанки (%)	48	67	50	39	48

Как видно из анализа данных табл. 26, связь болтанки с числом Ричардсона очень неопределенная. При $Ri < 2,0$ вероятность

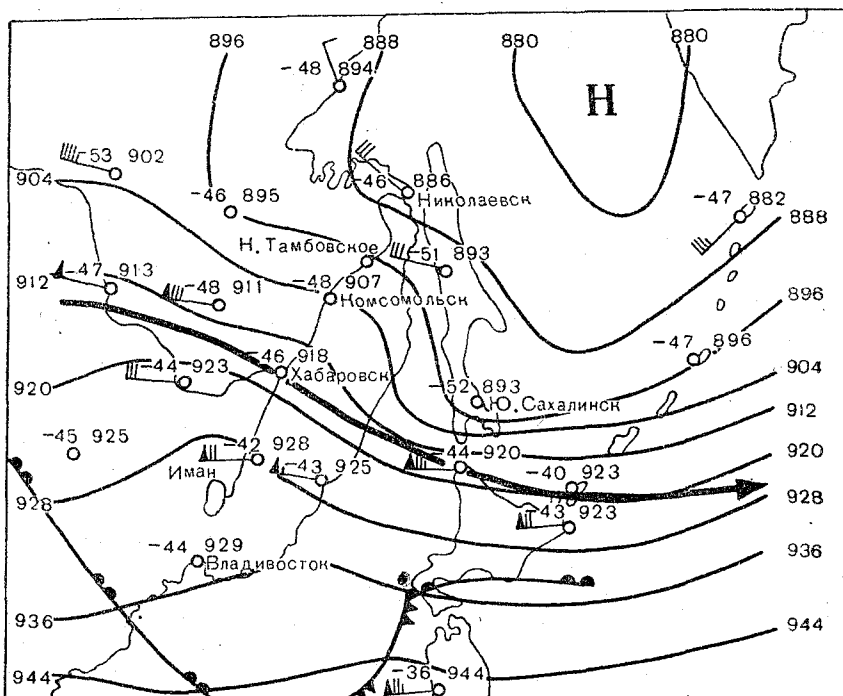


Рис. 31. Карта АТ₃₀₀, 3 часа 14 мая 1960 г. Полет в струйном течении. болтанки составляет всего 48%; при других значениях вероятность болтанки колеблется от 39 до 67%.

Была проведена оценка оправдываемости параметра Ричардсона по критерию Обухова: $Q=1-\alpha-\beta$, где $1-\alpha$ — относительное число удачных прогнозов наличия болтанки и $1-\beta$ — относительное число удачных прогнозов отсутствия болтанки. В нашем случае, подставляя в формулу соответствующие значения, получим: $Q=1-\alpha-\beta=1-0,52-0,47=0,01$. Отсюда следует, что параметр Ричардсона не является надежным критерием для характеристики турбулентности в данном слое.

В качестве примера, характеризующего условия турбулентности в области струйного течения, рассмотрим полеты, совершавшиеся 14 мая 1960 г. Аэросиноптическое положение в 3 часа этого дня представлено картой АТ₃₀₀ (рис. 31), на которой нанесено положение теплого фронта у поверхности земли. Этот фронт находился к юго-западу от Владивостока на расстоянии около 200 км. Его влияние сказывалось главным образом на участке Хабаровск—Владивосток, где преобладала верхняя и средняя облачность. Указанному фронту соответствовало струйное течение, ось которого проходила в передней части высотного гребня через Хабаровск на Южно-Сахалинск, т. е. приблизительно параллельно линии теплого фронта. Максимальные скорости ветра в струе на высоте около 9 км доходили до 180 км/час, на высоте около 11 км — до 200 км/час (по данным радиозондирования).

Область струйного течения была обследована по трем маршрутам: 1) Владивосток—Хабаровск—Николаевск, 2) Николаевск—Южно-Сахалинск и 3) Южно-Сахалинск—Хабаровск; при этом струйное течение пересекалось почти под прямым углом к его оси (Владивосток—Николаевск и Николаевск—Южно-Сахалинск), а также вдоль оси (Южно-Сахалинск—Хабаровск). Таким образом, полеты совершались как на циклонической стороне струйного течения, так и на антициклонической.

На первом из указанных маршрутов полеты совершались главным образом на высотах 6—9 км, т. е. под тропопаузой; на втором — над тропопаузой и на третьем — в зоне тропопаузы. Положение зон болтанки показано на представленных вертикальных разрезах атмосферы по первому (рис. 32) и третьему (рис. 33) маршрутам.

Для каждого маршрута были рассчитаны горизонтальные градиенты векторной скорости ветра. На первом маршруте измерения ветра производились через 100—150 км пути, а на втором и третьем представлялась возможность измерять ветер через 15—30 км, т. е. через 1—2 минуты полета.

Отметим характерные особенности полетов на каждом маршруте.

1. Участок трассы Владивосток—Хабаровск находился (рис. 32) на антициклонической стороне струи, в правом нижнем ее квадранте. Полет совершался на высотах 7 и 8 км и в основном проходил спокойно. Очень слабая болтанка (от 0,05 до 0,2 g) отмечалась лишь при входе и выходе из плотных перистых облаков.

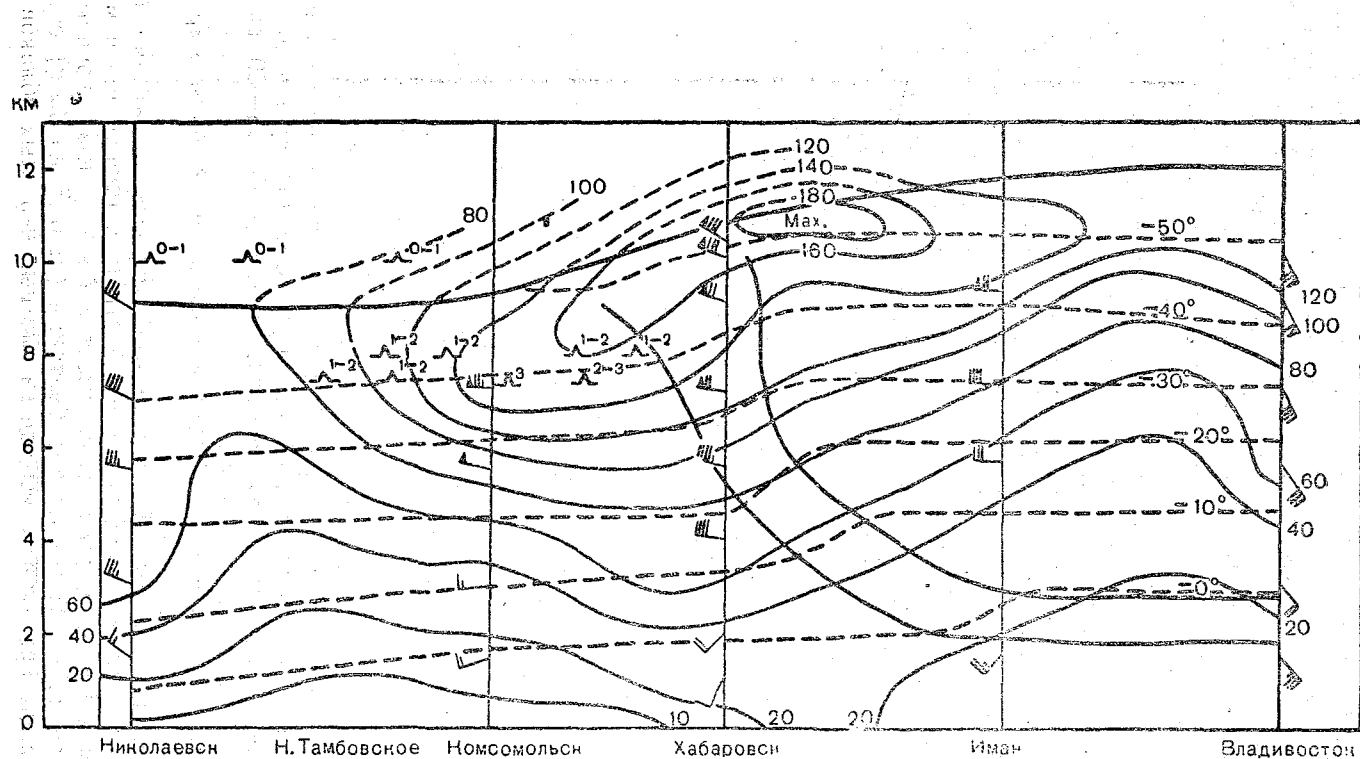


Рис. 32. Вертикальный разрез атмосферы по трассе Владивосток—Хабаровск—Николаевск, 3 часа 14 мая 1960 г.

В данном случае наблюдались сравнительно небольшие горизонтальные градиенты векторной скорости ветра и без резких изменений их величин. Это можно видеть по данным табл. 27. Скорость

Таблица 27

Горизонтальные градиенты векторной скорости ветра на участке
Владивосток—Хабаровск

Высота полета (км)	$\Gamma \frac{m}{сек}$ на 100 км			
7	2,8	3,1; 4,0	0,0	2,4
8	0,0	2,5	6,1	4,9

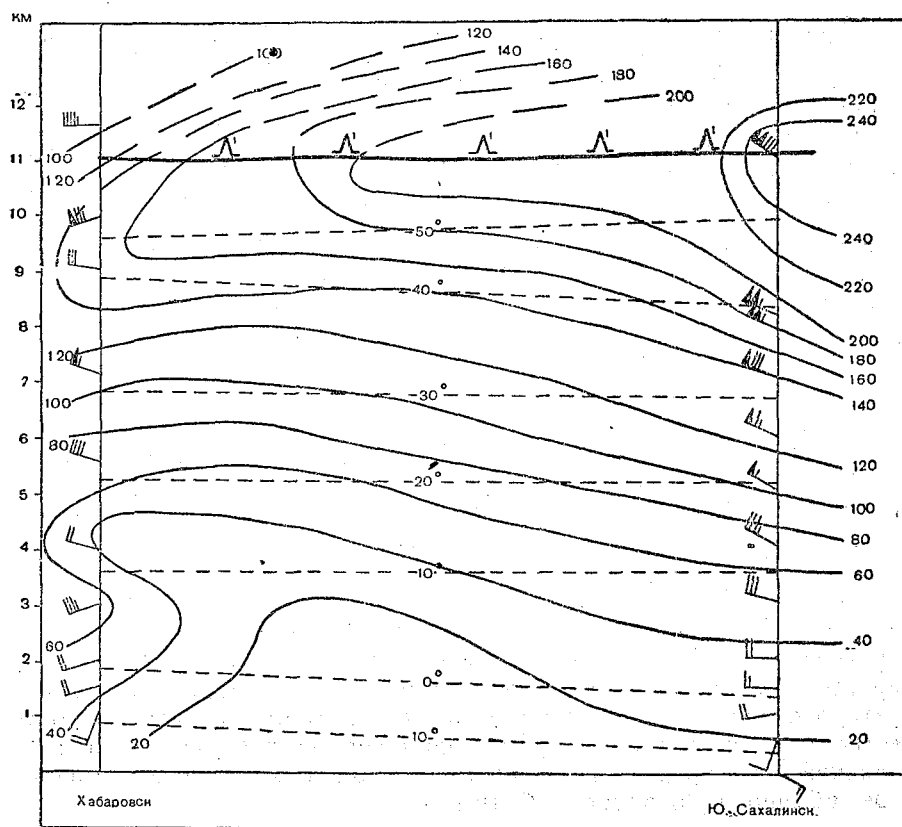


Рис. 33. Вертикальный разрез атмосферы по трассе Южно-Сахалинск — Хабаровск, 9 час. 14 мая 1960 г.

ветра постепенно убывала от Хабаровска к Владивостоку от 120 до 80 км/час.

Участок Хабаровск—Николаевск располагался на циклонической стороне струи, ниже оси. Полеты происходили на высотах от 6,5 до 9,3 км. Болтанка слабая до умеренной и местами до сильной наблюдалась на участке Хабаровск—Нижне-Тамбовское на каждом эшелоне. Зона турбулентности была обусловлена боковым сдвигом ветра, который был особенно замечен между пунктами Нижне-Тамбовское—Николаевск. Скорость ветра здесь на высоте около 7 км изменялась от 120 до 90 км/час, что соответствует среднему горизонтальному градиенту скорости ветра 37,5 км/час на 100 км. Болтанка отмечалась главным образом в области более сильного ветра. Ширина всей зоны болтанки составила около 300 км. Преобладала, однако, слабая болтанка и лишь местами отмечались сильные толчки с перегрузками до 1,0 g.

Для этой зоны характерно неравномерное распределение горизонтальных градиентов векторной скорости ветра. При полете на высоте 8 км эти градиенты имели следующие значения: 0,0; 1,1; 16,8; 28,0; 0,0; 1,8; 14,7 м/сек на 100 км.

2. Полет от Николаевска до Южно-Сахалинска также совершался поперек струи на циклонической ее стороне и происходил на высоте 11 км, т. е. над тропопаузой. На протяжении всего полета самолет испытывал слабую до умеренной болтанку. Значения горизонтальных градиентов векторной скорости ветра (при измерении через 1—2 мин. полета) были таковы: 4,4; 32,0; 29,0; 9,1; 9,0; 11,0; 71,0; 11,0; 30,0; 54,0 м/сек на 100 км. Как видим, распределение горизонтальных градиентов векторной скорости ветра было крайне неравномерным, отмечались скачки от 11 до 71 м/сек в пересчете на 100 км расстояния.

3. На маршруте Южно-Сахалинск—Хабаровск полет совершался вдоль оси струи на высоте 11 км, в зоне тропопаузы. В течение всего полета отмечалась слабая болтанка (до 0,2 g). Горизонтальные градиенты векторной скорости ветра на участке Южно-Сахалинск—Хабаровск распределялись довольно равномерно: 14,3; 16,0; 5,8; 5,8; 9,0 м/сек на 100 км.

На основании изложенного можно сказать, что экспериментальные полеты подтверждают основные положения по диагнозу и прогнозу турбулентности на больших высотах, рассмотренные в предыдущих разделах настоящей работы. Следует при этом отметить, что, как показали наблюдения над ветром в полете, скорость ветра в области струйного течения отличается большой горизонтальной неоднородностью, особенно на циклонической его стороне, где обычно наблюдается болтанка.

Глава V

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Статистическая обработка случаев с болтанкой и без болтанки в связи с различными формами высотного барического поля, с типами тропосферных фронтов, с конвергенцией и дивергенцией высотных воздушных течений, а также с облаками, скоростями ветра и тропопаузой показала, что хотя каждая из указанных особенностей атмосферных процессов играет важную роль в образовании зон болтанки, но ни одна из полученных связей не имеет достаточной статистической обеспеченности, чтобы ее можно было непосредственно применить для прогноза. Выяснилось, однако, что болтанка возникает не только при пересечении высотных ложбин, как это полагали раньше, но и в большей степени при пересечении высотных гребней. Точно так же зоны повышенной турбулентности на больших высотах почти в равной мере определяются как конвергенцией, так и дивергенцией воздушных течений.

2. Исследование подтвердило, что зоны болтанки самым тесным образом связаны со струйными течениями и с грозowymi очагами. Для лучшего же выяснения физических условий образования зон болтанки необходимо рассматривать указанные особенности атмосферных процессов не изолированно, а в тесной связи с особенностями высотного барического поля, с конвергенцией и дивергенцией, с тропосферными фронтами и др.

3. В области струйных течений значительная болтанка встречается главным образом в тех местах, где имеется резкий переход от больших горизонтальных градиентов геопотенциала (температуры) к малым, что в свою очередь проявляется в переходе от области сильных ветров к области относительно слабых ветров. Иными словами, благоприятные условия для возникновения болтанки создаются главным образом значительными горизонтальными градиентами скорости ветра, т. е. так называемыми горизонтальными сдвигами ветра.

4. Нужно учитывать два типа горизонтальных сдвигов ветра: 1) боковой сдвиг и 2) сдвиг по потоку.

Боковые сдвиги ветра наиболее отчетливо выражены в тех случаях, когда струйные течения связаны с тропосферными холодными и квазистационарными фронтами. Болтанка при этих сдвигах отмечается, как правило, на циклонической стороне струйного течения, т. е. слева от его оси (если смотреть по направлению потока). При этом сама зона болтанки обычно совпадает с областью относительно сильного ветра, т. е. располагается справа от оси высотной ложбины, ширина этой зоны в направлении, нормальном потоку, составляет 100—150 км.

Сдвиги ветра по потоку заслуживают особого внимания, так как на них приходится наибольшее количество случаев сильной болтанки, причем многие из них наблюдаются при ясном небе. Эти сдвиги выражаются в дивергенции высотных воздушных течений, следовательно, в уменьшении горизонтальных градиентов геопотенциала (температуры) в направлении потока, что характерно для дельты высотной фронтальной зоны. При этом нередко имеется переход кривизны изогипс от циклонического или прямолинейного вида к антициклоническому. Сдвиги ветра по потоку обычно образуются: а) в случае вхождения в систему обширной высотной депрессии нового циклона, вызывающего разветвление основного струйного течения; б) в передней части быстро движущихся молодых циклонов — перед теплыми фронтами; в) вблизи точки окклюзии.

Болтанка при горизонтальных сдвигах ветра по потоку, в отличие от боковых сдвигов, отмечается при относительно слабом ветре. Чем резче выражена расходимость изогипс и чем сильнее ветер в конвергентной части струйного течения, тем вероятнее интенсивная болтанка, но тем меньше по протяженности зона турбулентности. Ширина зоны болтанки в этих случаях в направлении потока составляет 100—150 км. В случаях постепенно дивергирующих изогипс, при активной адвекции теплого воздуха, протяженность зоны болтанки может составить до 1000 км и более.

5. Антициклонические боковые сдвиги ветра (справа от оси струйного течения) могут вызвать сильную турбулентность, если эти сдвиги одновременно являются и сдвигами ветра по потоку, т. е. совпадают с зоной дивергенции воздушных течений.

6. Анализ случаев болтанки в зонах фронтальной грозовой деятельности, как и отдельных случаев гроз, сопровождавшихся сильным развитием Сб, а также значительными ливневыми осадками, показывает, что эти явления связаны с теми участками фронтов, над которыми существует хорошо выраженная дивергенция высотных воздушных течений.

Таким образом, в зонах высотной дивергенции болтанка может встретиться как при ясном небе, так и при наличии мощных и грозовых явлений. В последних случаях существенную роль играют тропосферные фронты, дающие начало образованию облаков; высотная же дивергенция обеспечивает активное развитие этих обла-

ков до тропопаузы. Если же под зоной дивергенции фронтов не имеется, а также отсутствуют условия для развития термической конвекции, то болтанка в верхней тропосфере обычно наблюдается при ясном небе.

7. Установлено, что внутримассовые грозы с мощным вертикальным развитием Сб нередко развиваются в области высотных теплых гребней при антициклонической кривизне изогипс. Кроме того, грозы, возникающие в области высотных депрессий, получают наибольшее развитие не столько над центральной частью депрессии, сколько над восточной ее периферией, где господствуют слабые южные течения с тенденцией к дивергенции.

8. Умеренная и сильная болтанка в зоне тропопаузы может наблюдаться лишь тогда, когда этому благоприятствуют общие аэросиноптические условия. Для этого наиболее типичны те процессы, которые характеризуются активной адвекцией в тропосфере теплых воздушных масс в связи с быстрым перемещением западных и южных циклонов. В этих случаях наблюдается значительное локальное повышение нижней границы тропопаузы. Болтанка же наблюдается при этом в слое понижения температуры, заключенном между уровнями прежнего и нового положения нижней границы тропопаузы.

Если аэросиноптические процессы не благоприятствуют развитию умеренной и сильной болтанки в верхних слоях тропосферы, то полет в зоне тропопаузы проходит спокойно или при незначительной болтанке.

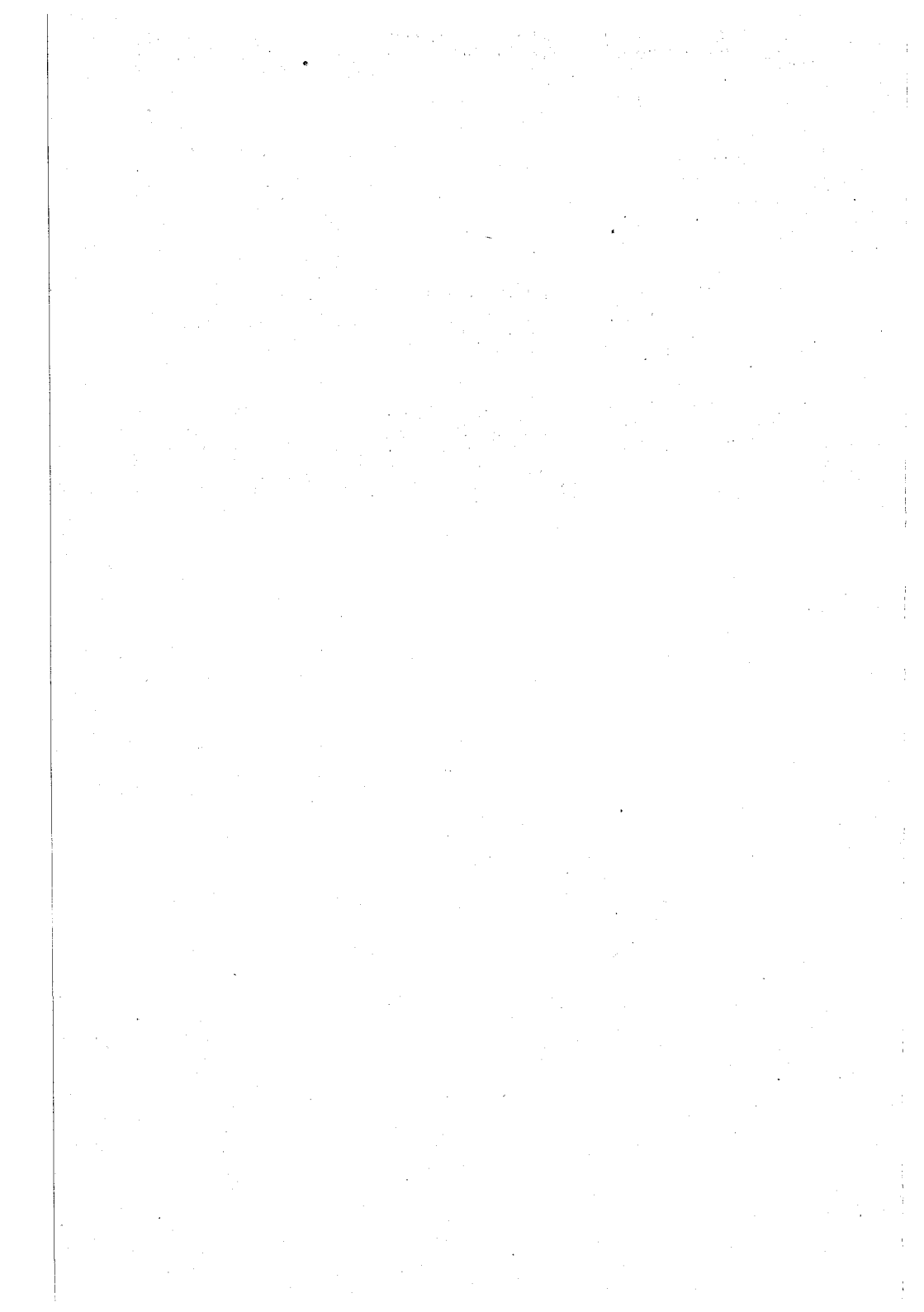
9. Использование критерия Ричардсона для диагноза турбулентности в верхней тропосфере и нижней стратосфере не дает положительных результатов. Поскольку высокий уровень турбулентной энергии определяется главным образом изменениями горизонтальных градиентов температуры, то, учитывая взаимосвязь последних с вертикальными градиентами скорости ветра, можно сказать, что уровень турбулентной энергии должен определяться изменениями с высотой вертикальных градиентов скорости ветра, а следовательно, и изменениями параметра Ричардсона. Таким образом, для оценки уровня турбулентности атмосферы и для определения тех слоев, в которых может наблюдаться болтанка, необходимо обращать внимание не только на большие β и малые Ri , но главным образом на характер изменения этих величин по вертикали.

10. Как показали тщательные измерения ветра при экспериментальных полетах, на циклонической стороне струйных течений, отличающейся повышенной турбулентностью, скорости ветра характеризуются значительно большей горизонтальной неоднородностью, чем на антициклонической стороне и на оси струйных течений.

ЛИТЕРАТУРА

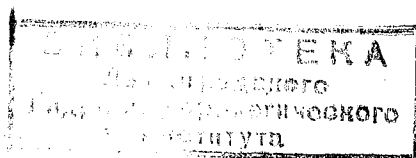
1. Бугаев В. А., Джорджио В. А., Петросянц М. А., Романов Н. Н. Аэросиноптические условия болтанки самолетов в Средней Азии. Труды САНИГМИ, вып. 14, 1958.
2. Городова М. И. Случай сильной болтанки. Центральный институт прогнозов. Методическое письмо. Гидрометеиздат. М. 1959.
3. Джорджио В. А. Струйное течение (Обзор зарубежных исследований). Труды Ташкентской геофизической обсерватории, вып. 12/13, 1956.
4. Заварина М. В., Юдин М. И. Уточнение числа Ричардсона для выявления зон болтанки самолетов. Метеорология и гидрология, № 2, 1960.
5. Кулик М. М. Обоснование рекомендаций по пилотированию самолетов при полетах в зонах атмосферной турбулентности. Отдел научно-технической информации. М. 1960.
6. Лайхтман Д. Л. и Шнайдман В. А. Критерии установившейся турбулентности в струйных течениях. Метеорология и гидрология, № 12, 1960.
7. Лукьянов Н. В. Обобщение результатов метеорологических наблюдений на больших высотах. ГУГМС. Методическое письмо, № 39, 1959.
8. Меджитов Р. М. Средние значения числа Ричардсона в нижнем пятикилометровом слое свободной атмосферы над Минском. Сборник работ Минской гидрометеорологической обсерватории, вып. 2, 1959.
9. Меджитов Р. М. Применение критерия Ричардсона к прогнозу болтанки самолетов. Сборник работ Минской гидрометеорологической обсерватории, вып. 2, 1959.
10. Милоков Н. П. и Зискин А. С. Опыт метеорологического обслуживания полетов реактивных самолетов. ГУГМС. Методическое письмо, № 39, 1959.
11. Орлова Е. М. К вопросу о расчете вертикальных скоростей по данным поля ветра. Метеорология и гидрология, № 1, 1955.
12. Петренко Н. В. Способы прогноза высоты тропопаузы. ГУГМС. Методическое письмо, № 37, 1959.
13. Петренко Н. В. Об использовании вертикальных разрезов атмосферы на АМСГ. ГУГМС. Методическое письмо, № 37, 1959.
14. Петренко Н. В., Шмелер С. М., Михайлов П. М., Титов Н. А. Временные указания о подготовке и проведении полетов на высотах 6—11 км при возможных встречах с зонами атмосферной турбулентности. ГУГВФ. 1958.
15. Пинус Н. З., Шмелер С. М. Некоторые особенности турбулентности атмосферы над горными районами. Труды ЦАО, вып. 24, 1958.
16. Пинус Н. З. Современное состояние вопроса о турбулентности свободной атмосферы, вызывающей болтанку самолетов. Труды ЦАО, вып. 34, 1960.
17. Пчелко И. Г. Метеорологические условия полетов на больших высотах. Гидрометеиздат, Л., 1957.

18. Пчелко И. Г. Некоторые особенности аэросиноптических условий болтанки самолетов в верхних слоях тропосферы. Методическое письмо, № 41, 1960.
 19. Решетов Г. Д. Прогноз высоты тропопаузы по картам AT_{700} , от 500 и 1000 и картам тропопаузы способом переноса. ГУГМС. Методическое письмо, № 37. 1959.
 20. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды, часть II. Гидрометеоздат. Л. 1955.
 21. Шмелер С. М. Турбулентность в облаках верхней тропосферы. Труды ЦАО, вып. 34. 1960.
 22. Arakawa H. Clear—air turbulence near the jet stream. Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 79, 162—163. 1953.
 23. Arakawa H. Comments on Herman Lake: Clear—air turbulence associated with negative vertical wind shear. J. Meteor. 14, 188—190. 1957.
 24. Bennon L. K. Weather systems associated with some occasions of severe turbulence of high turbulence and high altitude. Met. Mag. 81, 97. 1952.
 25. Clodman J. High level turbulence. Meteor. Branch, Dep. of Transport, Toronto, TEC 160, Cir. 2332. 1953.
 26. Clodman J. Turbulence in clear air and in cloud. Meteor. Branch, Dep. of Transport, Canada, TEC—320, Cir. 3315. 1960.
 27. Ramaswamy C. On the sub—tropical jet stream and its role in the development of large scale convection. Tellus, v. 8, No. 1, February. 1956.
 28. Reiter E. R. Turbulenz im wolkenfreien Raum. Berichte des Deutschen Wetterdienstes No. 61 (B. 9). Offenbach. M. 1960.
-



ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
Глава I. Результаты общей статистической обработки материала	7
Глава II. Термодинамические условия болтанки самолетов	17
Глава III. Аэросиноптические условия турбулентности, вызывающей болтанку самолетов в верхних слоях тропосферы и нижней стратосфере	33
1. Общие сведения	—
2. Анализ данных статистической обработки материала	36
3. Роль струйных течений в определении условий, благоприятных для возникновения болтанки самолетов	40
А. Болтанка при боковых сдвигах ветра	44
Б. Болтанка при горизонтальных сдвигах ветра по потоку	49
4. Болтанка в зоне грозовых очагов	55
Глава IV. Типичные случаи болтанки и особенности возникновения ее в зоне тропопаузы и нижней стратосфере	64
1. Типичные случаи болтанки	—
2. Особенности возникновения болтанки в зоне тропопаузы и нижней стратосфере	74
3. Некоторые результаты экспериментальных полетов по изучению турбулентности в струйных течениях	82
Глава V. Основные выводы	89
Литература	92



Иван Григорьевич Пчелко

АЭРОСИНОПТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ БОЛТАНКИ САМОЛЕТОВ В ВЕРХНИХ
СЛОЯХ ТРОПОСФЕРЫ И НИЖНЕЙ СТРАТОСФЕРЕ

Ответственный редактор *Н. В. Сагатовский*

Редактор *В. И. Тархунова*
Техн. редактор *И. М. Зарх*
Корректор *Н. И. Рыжкова*
Московское отделение Гидрометеониздата.
Москва, ул. Горького, д. 18-а

Т-02980	Сдано в набор 22/І 1962 г.
Изд. № 171	Подписано к печати 26/ІІІ 1962 г.
Печ. л. 6+2	Индекс М-М-171
Заказ № 84	Бумага 60×90 ¹ / ₁₆
	Уч. изд. л. 6,71
	Цена 34 коп.
	Тираж 1360

1-я типолитография Гимиза.
Москва, Измайловское шоссе, 42.