

ISSN 0130-3686

Академия наук СССР

Межведомственный геофизический комитет

Секция гляциологии

Институт географии

МАТЕРИАЛЫ ГЛЯЦИОЛОГИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Х Р О Н И Н А
О Б С У Ж Д Е Н И Я

ВЫПУСК 44

Москва

□□□□ 1982

ACADEMY OF SCIENCES OF THE U.S.S.R.

SECTION OF GLACIOLOGY
OF THE
SOVIET GEOPHYSICAL COMMITTEE AND
INSTITUTE OF GEOGRAPHY

DATA OF GLACIOLOGICAL STUDIES

CHRONICLE

DISCUSSION

Publication № 44 March 1982

MOSCOW

Проблеме воздушной волны, образующейся при сходе снежных лавин, посвящено много работ [3,4,8,10]. В большинстве из них делается, попытка объяснить природу этого явления на основе единичных наблюдений или же рассказов очевидцев. Систематические наблюдения за лавинами и их воздушными волнами, проведенные в Приэльбрусье, дали результаты, которые можно суммировать следующим образом.

The problem of air wave generated during avalanches, many works are devoted [3,4,8,10]. Most of them have done, trying to explain the nature of this phenomenon from a single observation or eyewitness accounts. Systematic observations of avalanches and their air waves conducted in the Elbrus region, produced results that can be summarized as follows.

1. Воздушные волны разрушительной силы образуются только у лавин из **сухого** снега, а наиболее мощные воздушные волны образуются у лавин из сухого свежеснежавшего снега [2, 5].

1. Air waves destructive formed only of dry snow avalanches, and the most powerful air waves are formed in dry avalanches of fresh snow [2, 5].

2. Воздушная волна оставляет на местности характерные для нее признаки, по которым как в зимний, так и в летний период можно определить наличие и дальность зон действия воздушных волн разной интенсивности, а также основные особенности ее движения и воздействия [5].

2. Air wave leaves the area its characteristic features, which both in winter and in summer, you can determine the presence and range of areas of the air waves of varying intensity, as well as the main features of its movement and effects. [5]

3. Дальность воздействия воздушной волны зависит от объема лавины, геометрии лавинного очага и свойств снега. Получены зависимости размеров зоны разрушительного действия воздушных волн от площади и длины лавинного очага, а также объема лавины. На Центральном Кавказе при расчете дальности выброса лавин следует добавлять на воздействие воздушной волны не менее 12% длины пути лавины [6]. Большая дальность зоны разрушительного воздействия воздушной волны в 200-300 м характерна только для сухих лавин объемом более 100 тыс.м³. С дальнейшим увеличением объемов лавин эта дальность растет все медленнее [2].

3. Range impact of an air wave depends on the avalanche, avalanche chamber geometry and properties of snow. Depending on the size of the zone received the ravages of air waves on the size and length of the avalanche chamber, and the volume of the avalanche. In the Central Caucasus in calculating the range of emission avalanches should be added to the impact of an air wave of at least 12% the length of the avalanche path. [6] Long range area damaging effects of air waves in the 200-300 m typical for dry avalanches of more than 100 000 m³. With a further increase in volumes avalanches this range is growing more slowly. [2]

4. Разработана методика оценки параметров воздушной волны по пологам и повалам деревьев, которая может применяться при изысканиях и оценке лавиноопасных территорий. Полученные по этой методике оценки давления динамического напора воздушной волны у наиболее крупных лавин в Приэльбрусье дали величину около 2000 кг/м² сразу за границей лавинных отложений [2].

4. Developed a method estimating the parameters of an air wave on the floor and fell a tree, which can be used for exploration and evaluation of avalanche areas. Obtained by this method of estimating pressure dynamic pressure of the air wave in the largest avalanche in the Elbrus region get a value of about 2000 kg/m² just outside of avalanche deposits [2].

5. С помощью специально изготовленных датчиков проведены единичные измерения давления в зоне воздействия волны [6]. На основе наблюдений, данных расчетов и проведенных измерений предложена новая концепция природы воздушной волны, суть которой заключается в следующем [2]. При сходе сухой лавины образуется мощное снеговоздушное облако, окутывающее тело лавины, которое при выходе лавины на конус обгоняет последнее изза меньшего сопротивления и проходит на десятки и сотни метров дальше остановившейся лавины. Поскольку плотность снеговоздушного облака в 5-20 раз больше плотности воздуха, при сравнительно небольших скоростях 10-50 м/с оно развивает значительные давления.

5. Using a specially constructed sensors made a few measurements of pressure in the zone of influence of the wave [6]. Based on observations, calculations and measurements suggested a new conception of the nature of an air wave, the essence of which is as follows [2]. When going dry avalanches form a powerful snowair cloud shrouding the body of the avalanche, which exit avalanche cone ahead of the last because of least resistance and

goes to hundreds of meters down to stop the avalanche. Since the density of the cloud snowair cloud 5-20 times greater than the density of air at relatively low speeds of 10-50 m / s, it develops considerable pressure.

Поскольку выдвигавшиеся до сих пор гипотезы о природе возникновения воздушной волны лавины основаны преимущественно на качественных и оценочных данных, что не позволяет исследователям принять единую точку зрения на механизм возникновения воздушной волны, интерес к этому явлению остается повышенным и появляются новые гипотезы. В связи с интенсивным освоением горных территорий вопрос о воздушной волне приобретает и существенный практический интерес. Инженерная практика требует обоснованных расчетных методов оценки пределов разрушительного воздействия воздушных волн и способов защиты от них.

As put forward so far hypotheses about the nature of airwave avalanches are based largely on the quality and performance data, which does not allow researchers to take a single point of view on the mechanism of the air waves, the interest in this phenomenon remains high and new hypotheses. In connection with the intensive development of the mountain areas the issue of the air waves and acquires considerable practical interest. Engineering practice requires reasonable computational methods to assess the limits of the damaging effects of air waves and how to protect them.

Для получения экспериментальных данных в верховьях р.Баксан на Центральном Кавказе на лавинном конусе очага № 2 (под названием «домашняя лавина») был построен экспериментальный телеметрический комплекс для измерения основных параметров воздушной волны в натурных условиях. Выбранный лавинный очаг средних размеров типичен для Центрального Кавказа - это лотковая лавина из денудационной воронки по классификации Г.К.Тушинского, Описание и морфометрические данные очага № 2 представлены в работе [7]. Телеметрический комплекс состоит из трех мачт высотой 20 м, расположенных последовательно одна за другой по направлению движения лавины и ее воздушной волны, измерительной аппаратуры, размещенной на мачтах, сигнального кабеля, по которому проводится передача информации на регистрирующую аппаратуру, силового кабеля для питания датчиков измерительной аппаратуры и датчика включения регистрирующей аппаратуры. Комплекс предназначен для одновременного измерения в нескольких точках и автоматической регистрации параметров снеговоздушного облака, сопровождающего сход лавин. Подробное описание телеметрического комплекса дано в работе [7].

To obtain experimental data in the Upper the river of Baksan in the Central Caucasus in the avalanche cone hearth number 2 (called "home avalanche") built an experimental telemetry system for measuring the main parameters of the air waves in natural conditions. Selected avalanche center medium size typical of the Central Caucasus - is flume avalanche of denudation funnel G.K.Tushinskogo classification, description and morphometric data hearth number 2 presented in [7]. Telemetric complex consists of three towers 20 meters high, located one after another in the direction of the avalanche and the air waves, measuring equipment placed on the masts, signal cables, which were carried out by the transmission of information on recording equipment, power cable to power the sensor instrumentation sensor and enable the recording apparatus. The system is designed for the simultaneous measurement at several points and the automatic registration of parameters snowair clouds accompanying avalanches. A detailed description of the telemetry complex is given in [7].

С помощью экспериментального комплекса измерялись динамические характеристики снеговоздушного потока - скорость и давление торможения (динамический напор). Плотность потока вычислялась, так как прямое его измерение связано с большими техническими трудностями. Единственный опыт измерения плотности лавинного потока с помощью гамма - источника описан в работе [9]. Выбор типа датчиков и их разработка также связаны с известными трудностями. Мы выбрали датчики, исходя из опыта наших предварительных экспериментальных работ по измерению давлений и скоростей лавины [6]. Для повышения надежности информации о параметрах движущейся лавины наряду с телеметрическими датчиками применялись контрольные датчики с визуальным отсчетом.

Using the experimental complex dynamic characteristics were measured snowair flow - speed and brake pressure (dynamic pressure). Flux density was calculated as the direct measurement of it due to technical difficulties. Only experience of measuring the density of the avalanche flow by gamma - source described in [9]. Select the type of sensors and their development is also associated with certain difficulties. We chose the sensors, based on the experience of our preliminary experimental work on the measurement of pressure and velocity of the avalanche. [6] To improve the reliability of information about the parameters of the moving avalanche, along with the remote sensor control sensors used with a visual readout.

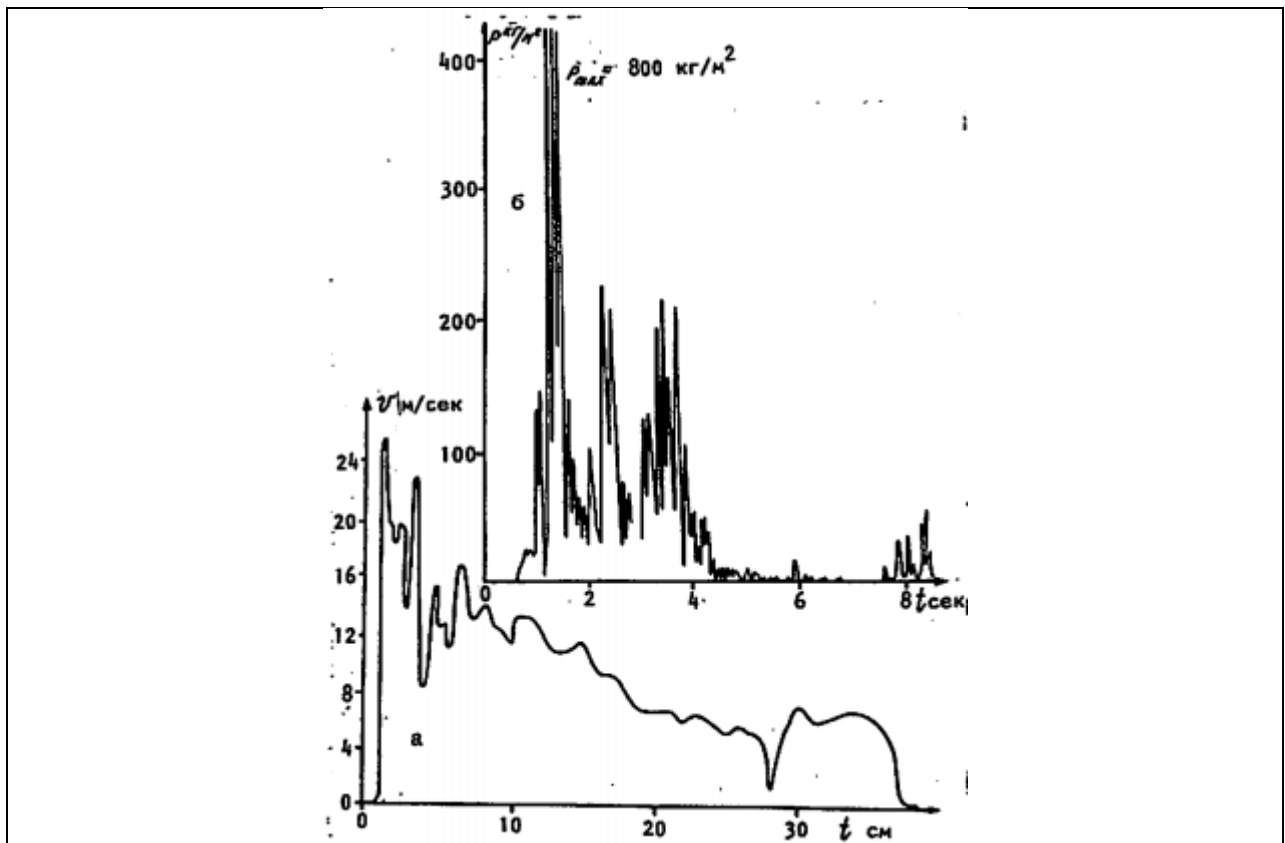


Рис.1 Измерение во времени t динамического напора p и скорости v воздушной волны лавины
Figure 1 Measurement of time t the dynamic pressure p and velocity v airwave avalanche

Среди параметров лавинного потока наибольший интерес представляют скорость, плотность и давление, связанные между собой в условиях квазистационарности потока функциональной зависимостью. Любой из этих трех параметров вычисляется, если известны значения двух других. Труднее всего измерить мгновенную плотность потока, поэтому были разработаны и изготовлены датчики для измерения скорости и давления снеговоздушного потока.

Among the parameters of the avalanche flow of greatest interest are the velocity, density and pressure associated with each other in a quasi-steady flow of a functional dependency. Any of these three options is calculated, if the values of the other two. It is more difficult to measure is the instantaneous flux density, so were designed and manufactured sensors to measure the velocity and pressure snowair flow.

На рис.1 показаны результаты синхронных измерений скорости и динамического напора на высоте 5,5 м от поверхности земли. При анализе этого графика следует иметь в виду, что датчик скорости обладает значительной инерцией (постоянная времени около 0,5с), в то время как датчик динамического напора практически безинерционен. Поскольку в пульсации динамического напора

Figure 1 shows the results of simultaneous measurements of the velocity and the dynamic pressure at a height of 5.5 m above the ground. In the analysis of this plot should be borne in mind that the speed sensor has considerable inertia (time constant of 0.5 s), while the dynamic pressure sensor almost inertialess. Since the dynamic pressure pulsations

$$P = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (1)$$

вносят вклад и пульсации плотности, и пульсации скорости, то по зарегистрированным в экспериментах данным трудно судить о пространственно-временной изменчивости каждого из этих параметров в отдельности. Плотность потока вычислялась по соотношению (1), но поскольку датчики динамического напора калибровались в аэродинамической трубе с помощью формулы

contribute and density fluctuations and velocity fluctuations, then registered in the experiment data is difficult to judge the spatial and temporal variability of each of these parameters separately. Flux density was calculated using equation (1), but because the dynamic pressure sensors were calibrated in the wind tunnel with the formula

$$P = \frac{F}{C_x S}$$

где F - сила, действующая на пластинку, ориентированную нормально к потоку, S - ее площадь, C_x - коэффициент лобового сопротивления, то вычисленные значения плотности могут отклоняться от действительных в той степени, в какой коэффициент C_x пластинки изменяется из-за присутствия в потоке снежной фазы.

where F -force acting on the plate is normal to the flow, S - its area, C_x - drag coefficient, the calculated density values may deviate from the real to the extent that the coefficient C_x of the plate changes due to the presence of snow stream phase.

Анализ зарегистрированных в опытах зависимостей скорости и динамического напора от времени показывает следующее. В момент прихода лавины значения скорости и плотности в течение долей секунды нарастают до своего максимального значения. Дальнейший ход этих временных зависимостей резко различен. Огибающая зависимости скорости от времени медленно спадает, причем закон этого спада удовлетворительно описывается формулой

The analysis reported in the experiments dependency rate and the dynamic pressure of the time shows the following. At the time of the arrival of the avalanche speed and density for a second increase to its maximum value. The further course of the time dependence dramatically different. The envelope of the velocity versus time slowly subsides, and the law of this recession well described by the formula

$$\frac{v(t)}{v_0} = \frac{1}{1 + \frac{v_0 t}{\lambda}}, \quad v_0 = v(0) \quad (2)$$

где λ -const, t - время с момента прихода к датчику фронта облака. Зависимость (2), естественно, справедлива при $t \leq T_k$, где T_k - время прохождения лавины. Значения λ , удовлетворяющие наилучшей аппроксимации экспериментальных данных с помощью (2), лежат в пределах $\lambda \sim 200-400$ м. Длины типичных лавин, рассчитанные по формуле

where λ -const, t - time since coming to the sensor front clouds. Dependence (2), of course, is valid for $t \leq T_k$, where T_k - time of the avalanche. The values of λ , satisfying the best fit of experimental data using (2), are in the range $\lambda \sim 200-400$ m long typical avalanches, calculated by the formula

$$L = \int_0^{T_k} v(t) dt = v_{cp} T_k$$

составляют примерно 200-300 м.
is approximately 200-300 m

Огибающая зависимости плотности снеговоздушной смеси от времени из-за медленного убывания скорости весьма близка к огибающей динамического напора. Характерной чертой зависимости плотности от времени является ее резкое убывание уже на второй секунде после прохождения фронта лавины. После нескольких колебаний плотность смеси на четвертой секунде после прохождения фронта уже мало отличается от плотности воздуха, хотя на восьмой секунде и зарегистрировано незначительное скопление снежной пыли со средней плотностью около $2,5 \text{ кг/м}^3$. Максимальная плотность смеси в рассматриваемом случае превышала 20 кг/м^3 .

Depending on the density of the envelope snowair mix from time due to the slow decay rate is very close to the envelope of the dynamic pressure. A characteristic feature of the dependence of the time it is a sharp decrease on the 2 second of the front of the avalanche. After several oscillations in the density of the fourth second after the passage of the front is a little different from the density of the air, although eight seconds and registered a slight accumulation of snow dust with an average density of about 2.5 kg/m^3 . The maximum density of the mixture in this case greater than 20 kg/m^3 .

Для других лавин, зарегистрированных измерительным комплексом, зависимости скорости и плотности от времени сохраняют такой же характер. С удалением от поверхности земли отмечается более поздний приход фронта лавины, уменьшение максимальных значений динамического напора и расширение временного интервала, в течение которого плотность смеси существенно отличается от плотности воздуха.

For other avalanches registered meter, depending on the speed and density on time retain the same character. As the distance from the ground marked the later arrival of the front of the avalanche, reducing the maximum dynamic pressure and extension of the time interval during which the density of the mixture is significantly different from the density of air.

Анализ результатов синхронных измерений скорости и давления в снеговоздушном потоке позволяет проникнуть в детали механизма генерации снеговоздушной волны. Во время стационарного движения пылевой лавины от передней кромки лавинного тела отходит присоединенная снеговоздушная волна. Качественная схема образования этой волны показана на рис.2.

Analysis of the results of synchronous measurements of the velocity and pressure in the flow snowair lets get into the details of the mechanism of generation snowair wave. During steady-state motion dust-storm from the front left edge of the avalanche body leaves attached snowair wave. Qualitative scheme of formation of this wave is shown in Figure 2.

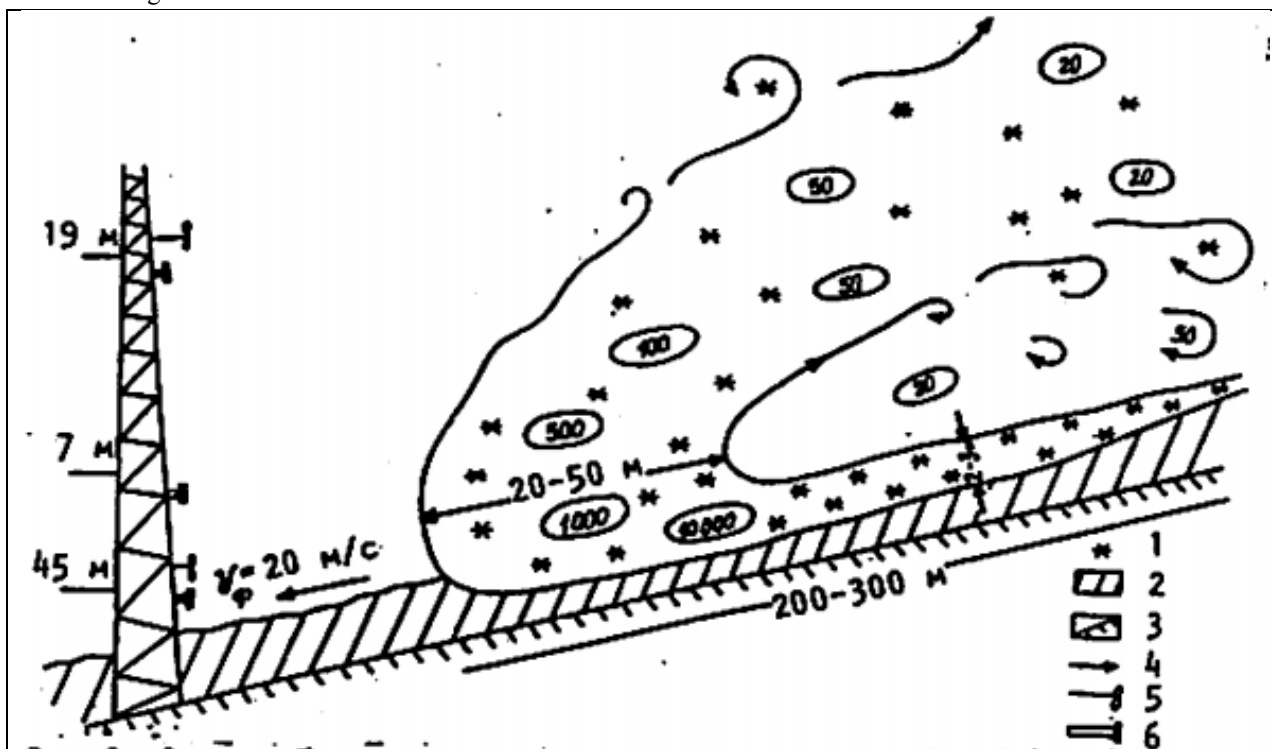


Рис.2. Схема образования снеговоздушной волны лавины. 1 - снежинки, 2 - подстилающая поверхность, 3 – старый снег, 4 - линии тока, 5 - датчик скорости, 6 - датчик давления, 7 – давление кг/м²

Fig.2. Scheme of the wave snowair avalanche. 1 - snowflakes, 2 - the underlying surface, 3 - Snow, 4 - flow lines, 5 - speed sensor, 6 - pressure sensor, 7 - pressure kg/m²

Присоединенная волна представляет собой отходящую от головной части лавины вверх и назад и насыщенную снежной пылью сравнительно узкую воздушную пелену, толщиной примерно 10-20% длины лавины. Величина скорости потока в пелене близка к скорости фронта лавины. Вне пелены скорость потока изменяется незначительно, в то время как плотность смеси падает практически до плотности воздуха. Сама пелена имеет тонкую структуру и может состоять из ряда полос и сгустков с большими, чем в промежутках между ними, значениями плотности и динамического напора.

Adjoint wave is extending from the head of the avalanche up and back and intense snow dust relatively narrow air shroud, a thickness of about 10-20% of the length of the avalanche. The value of the flow rate in a shroud close to the speed of the front of the avalanche. Outside the veil of the flow rate varies slightly, while the density of the mixture drops to the air density. Shroud itself has a fine structure and may consist of a number of bands and clusters with greater than in the intervals between them, density and dynamic pressure.

Отдельные пики в показаниях датчика динамического напора могут быть обусловлены прохождением таких сгустков и ударами снежных комьев.

Продольные градиенты плотности, оцениваемые по результатам измерений, даже после их осреднения достигают значительных величин

Individual peaks in the dynamic pressure sensor readings can be caused by the passage of clots and strokes snow clods.

Longitudinal gradients of density, as measured by the measurement, even after they reach high values averaging

$$\frac{1}{\rho_b} \frac{\partial \rho}{\partial x} \approx \frac{1}{\rho_b v_0} \frac{\partial \rho}{\partial t} \approx 1 \text{ м}^{-1}$$

Здесь ρ_b – плотность воздуха.

Here ρ_b - air density.

Известные предложенные механизмы [3] образования снежнопылевой части лавины предполагают одновременное и однородное поступление снежной пыли в воздух со всей поверхности лавинного тела. При этом, естественно, предполагается, что в образующемся облаке существует стратификация плотности по

высоте, а горизонтальные неоднородности могут возникать лишь благодаря крупномасштабной турбулентности. Однако, как уже указывалось, основная масса снежной пыли сосредоточена во фронтальной зоне снеговоздушного облака лавины. В остальной части облака количество снежной пыли настолько мало, что плотность смеси практически не отличается от плотности воздуха, хотя она и содержит достаточное количество пыли, чтобы быть непрозрачной для глаза.

Known mechanisms proposed [3] snowair formation of avalanches involve simultaneous and uniform flow of snow dust in the air from the entire surface of the avalanche body. This, of course, assumes that there is a cloud in the resulting density stratification in height and horizontal irregularities can occur only through large-scale turbulence. However, as already mentioned, most of the snow dust is concentrated in the frontal zone snowair cloud avalanche. In the rest of the cloud of snow dust is so small that the density of the mixture does not differ from the density of the air, although it contains enough dust to be opaque to the eye.

Усиленную генерацию снежной пыли на переднем фронте лавины можно объяснить следующим образом. Головная часть лавины имеет плавный и довольно крутой профиль. При ее обтекании воздухом происходит оттеснение набегающего воздушного потока в поперечных к направлению движения лавины направлениях, и этот поток уносит с собой сдуваемую снежную пыль, питая тем самым снеговоздушную пелену. Аналогичную картину можно наблюдать при обтекании достаточно крутого снежного бугра или песчаного бархана. Однако обтекаемая воздухом головная часть лавины не есть твердое тело, она под действием скоростного напора воздуха деформируется и растекается в поперечных направлениях, резко увеличивая количество снежной пыли, поступающей в пелену. Этот эффект аналогичен явлению растекания кумулятивной струи, проникающей в преграду. В данном случае «струей» является лавина, а «преграда» - это окружающий воздух. Неоднородность распределения плотности, скорости и глубины потока вдоль лавинной «струи» приводит к соответствующей неоднородности мощности источника, питающего пелену, и, как следствие, к неоднородности пространственного строения самой пелены и распределения параметров в ней. Предлагаемая схема описывает механизм возникновения плотной снеговоздушной струи у головной части лавины и предполагает, что дальнейшее уменьшение плотности смеси будет происходить за счет турбулентной диффузии и седиментации снежной пыли.

Enhanced generation of snow dust on the leading edge of the avalanche can be explained as follows. The head part of the avalanche is smooth and fairly steep profile. With its air flow is pushing off the oncoming air flow perpendicular to the direction of motion of the avalanche areas, and this flow carries away the snow blows off the dust, thus fueling snowair veil. A similar pattern can be observed in the flow rather steep hill of snow or sand dune. However, the head part of the streamlined air avalanche is not solid, it is under the ram air deforms and flows in the transverse directions, dramatically increasing the amount of snow dust entering the veil. This effect is similar to the phenomenon of spreading the cumulative jet penetrating the barrier. In this case the "jet" is an avalanche, and the "barrier" - is the ambient air. Heterogeneity of distribution of density, velocity and flow depth along the avalanche "jets" results in a corresponding heterogeneity power source feeding the veil, and, as a consequence, the spatial heterogeneity of the structure itself shroud and distribution parameters in it. The proposed scheme describes the mechanism of dense snowair jet at the head of the avalanche, and suggests that further reduction in the density of the mixture will be due to turbulent diffusion and sedimentation of snow dust.

Таким образом, присоединенная снеговоздушная волна является фазовым образованием, движущимся со скоростью фронта лавины. Снежная пыль в этом образовании все время обновляется, поступая из головной части лавины и, возможно, из ее внутренней части за счет турбулентного взаимодействия облака с телом лавины. Границы присоединенной волны, вначале резко очерченные, постепенно размываются с удалением вверх и вглубь за счет турбулентной диффузии и седиментации.

Thus, the associated wave is snowair phase formation, traveling at the front of the avalanche. Snow dust in the formation of a work in progress, will come from the head of the avalanche, and, possibly, its interior by turbulent clouds of interaction with the body of an avalanche. The boundaries of the associated wave, initially sharply defined, gradually blurred with distance and depth up due to turbulent diffusion and sedimentation.

Во время замедления движения лавинного тела при выходе его на выполаживающийся участок тяжелая снеговоздушная масса продолжает двигаться по инерции, присоединенная воздушная волна отрывается от головной части лавины и становится свободной. В ней возникают два новых фактора: практически полное прекращение подпитки снежной пылью из тела лавины и появление дополнительной силы касательного напряжения, действующей на свободную волну со стороны подстилающей поверхности. Воздействие этих двух факторов приводит к появлению новых черт, отличающих свободную воздушную волну от присоединенной. Действительно, свободная воздушная волна представляет собой уже не фазовое образование, а материальное тело, движущееся с групповой скоростью составляющих его частиц. Импульс

центра масс свободной волны убывает за счет убыли массы в силу выпадения снежной пыли и действия сил аэродинамического сопротивления и сил трения о подстилающую поверхность.

During deceleration avalanche body when leaving it to flatten land heavy weight snowair keep moving, the associated air wave breaks away from the head of the avalanche and becomes free. In it, two new factors: the almost complete cessation of feeding snow dust from the body of the avalanche and the emergence of an additional force of shear stress acting on the free waves of the earth's surface. The impact of these two factors leads to the appearance of new features that distinguish the free air wave from the merger. Indeed, the free air wave is not the phase formation, and the material body moving with the group velocity of its constituent particles. Momentum of the center of mass of a free wave decreases due to the mass loss due to loss of snow dust and the forces of air resistance and friction forces on the underlying surface.

Структура снеговоздушной волны напоминает структуру кометы: плотная головная часть и длинный разреженный хвост. Плотность аэрозоля в головной части волны довольно быстро убывает по мере ее продвижения как вследствие описанных выше процессов диффузии и седиментации, так и из-за расширения головной части, происходящего с вовлечением окружающего воздуха, не содержащего снежной пыли. Отметим, что этот последний процесс приводит к росту миделева сечения волны и соответствующему увеличению аэродинамического сопротивления.

Snowair wave structure resembles that of a comet: a dense head and a long thin tail. Density of aerosol in the head of the wave decreases quite rapidly as it moves as a result of the above processes of diffusion and sedimentation, and because the head of the expansion taking place with the involvement of the surrounding air that is free of snow dust. Note that this latter process increases the midsection and a corresponding increase in wave drag.

Для расчета закона движения центра масс оторвавшейся снеговоздушной волны по плоской поверхности можно в первом приближении написать уравнение движения в виде

For the calculation of the center of mass of the law detached snowair waves on a flat surface can be a first approximation to write the equation of motion as

$$M \frac{dv}{dt} = -C_x \frac{\rho v^2}{2} S - \tau L D \quad (3)$$

Где $M \sim \rho_c L S$ - масса головной части снеговоздушного облака, $S \sim D H$ - площадь миделева сечения, D ширина по фронту, L - глубина, τ - напряжение турбулентного трения о подстилающую поверхность. Уравнение (3) без второго члена в правой части использовалось в работе [10].

Для оценки турбулентного трения воспользуемся известным из гидравлики соотношением $\tau = \frac{k \rho_c v^2}{4}$, где $K = 0,01 - 0,04$ для широкого диапазона чисел Рейнольдса и параметра шероховатости подстилающей поверхности. Деля уравнение (3) на массу M , можно привести его к следующему виду:

Where $M \sim \rho_c L S$ - Weight of the warhead snowair clouds, $S \sim D H$ - area midsection, D wide in front, L - depth, τ - turbulent friction stress on the underlying surface. Equation (3) without the second term on the right side was used in [10].

To estimate the turbulent drag use the known ratio of hydraulic $\tau = \frac{k \rho_c v^2}{4}$, where $K = 0,01 - 0,04$ for a wide range of Reynolds numbers and surface roughness parameters. Dividing equation (3) by the mass M , we can bring it to the following form:

$$\frac{dv}{dt} + \frac{1}{\lambda} v^2 = 0, \quad \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2}$$

$$\lambda_1 = \frac{2 \rho_c L}{\rho C_x}, \lambda_2 = \frac{8 H}{K} \quad (4)$$

где λ_1 и λ_2 - коэффициенты затухания, обусловленные соответственно аэродинамическим сопротивлением и трением о поверхность.

where λ_1 and λ_2 - damping coefficients, respectively, due to air resistance and friction on the surface.

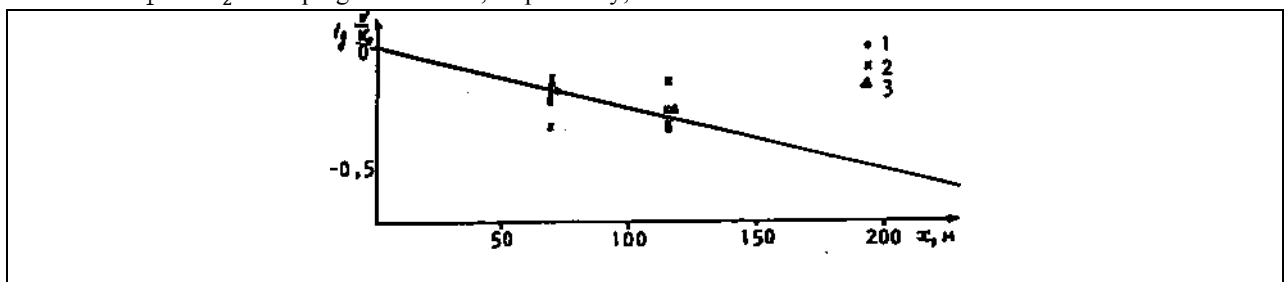


Рис.3. Зависимость изменения скорости воздушной волны лавины от расстояния. 1 - слабая лавина, 2 - средняя лавина, 3 - сильная лавина
 Fig. 3 . Dependence of the rate of air wave avalanches from a distance. 1 - weak avalanche, 2 - medium avalanche, 3 - severe avalanche

Численные оценки коэффициентов уравнения (4) на начальном этапе движения снеговоздушного облака приводят к следующим значениям, типичным для данного лавинного лотка.

Numerical estimates of the coefficients of equation (4) in the initial phase of the movement snowair clouds lead to the following values, typical for the avalanche tray.

Поскольку плотность смеси ρ_c в среднем в 10 раз превышает плотность воздуха, а L лежит в пределах 20 – 60 м, получим при $C_x \sim 1$, что $\lambda_1 = 400 - 1200$ м. При начальном значении высоты облака $H \sim 10$ м и указанном значении K второй коэффициент затухания лежит в пределах $\lambda_2 = 2000 - 8000$ м. Сравнение λ_1 и λ_2 показывает, что основным фактором, определяющим замедление снеговоздушного облака, является аэродинамическое сопротивление. По мере продвижения облака λ_1 убывает из-за преобладающего убывания плотности ρ_c по сравнению с незначительным ростом глубины L . В то же время вместе с ростом высоты облака возрастает λ_2 . В силу этого увеличивается относительный вклад аэродинамического сопротивления в силы, тормозящие дальнейшее продвижение снеговоздушного облака.

Since the density of the mixture ρ_c on average 10 times the density of air, and L is in the range 20 - 60 m, we obtain, $C_x \sim 1$, $\lambda_1 = 400-1200$ m at the initial value of cloud height $H \sim 10$ m, and this value of K second attenuation ranges $\lambda_2 = 2000-8000$ m and λ_2 λ_1 comparison shows that the main factor determining the deceleration snowair cloud is a drag. As we move clouds λ_1 decreases because of the prevailing density ρ_c decrease compared with a slight increase in the depth of L . At the same time, with increasing altitude clouds increases λ_2 . Because of this increased relative contribution of the drag force in hindering further progress snowair clouds.

Решение уравнения (4) при $\lambda = \text{const}$ имеет вид

The solution of equation (4) with $\lambda = \text{const}$ has the form

$$v = v_0 e^{-\frac{x}{\lambda}}, x = \lambda \ln \left(1 + \frac{v_0 t}{\lambda} \right), \quad (5)$$

Где $v = v_0(0)$, x - координата центра масс. Оценка коэффициента по экспериментальным данным приводит к величине $\lambda = 200$ м, что совпадает с качественными оценками по визуальным наблюдениям. Соответствующие данные представлены на рис.3, где по оси абсцисс отложено расстояние в метрах, а по оси ординат - логарифм отношения максимальной скорости в данной точке пространства к максимальной скорости, измеренной на первой мачте. Группировка данных проводилась качественно с учетом объема лавины, ее скорости и дальности выброса. Близость значений λ , определенных обоими способами, подтверждает гипотезу, что в первом приближении движение снеговоздушного облака может рассматриваться как движение твердого тела.

Where $v = v_0(0)$, x - coordinate of the center of mass. Coefficient estimate from the experimental data leads to the value $\lambda = 200$ m, which coincides with a qualitative assessment by visual observations. Provided data on Fig.3, where the abscissa is the distance in meters, and the vertical axis - the logarithm of the maximum speed at a given point to the maximum speed measured on the first tower. Grouped data were qualitatively by the volume of the avalanche, the speed and range of its output. The closeness of the values of λ , defined by both methods support the hypothesis that in the first approximation the motion snowair clouds can be seen as a rigid body.

Другой важной характеристикой свободной снеговоздушной волны является деформация профиля скорости в ее головной части. Из-за трения о подстилающую поверхность. На рис.4 показаны значения максимальной скорости на разных высотах на всех трех мачтах, нормированные на значение скорости, полученное на первой мачте на высоте 15 м. Как и следовало ожидать, в нижней части поток тормозится быстрее, чем в верхней. При этом для слабых лавин, у которых отрыв снеговоздушной волны происходит ближе к лавинному конусу, измерения на третьей мачте показывают относительно более позднюю стадию деформации поля скоростей, когда скорость в верней части волны больше, чем в нижней.

Another important characteristic of a free snowair wave is a deformation of the velocity profile in its warhead. Friction on the underlying surface. Figure 4 shows the maximum speed at different heights on all three masts, normalized to the value of the velocity obtained in the first tower at a height of 15 m as expected, at the bottom of the flow slowed down faster than the top. In this case, the weak avalanches whose separation snowair wave is closer to the avalanche cone, measuring the third mast show a relatively later stage of the deformation of the velocity field, where the velocity in the upper part of the wave is greater than at the bottom.

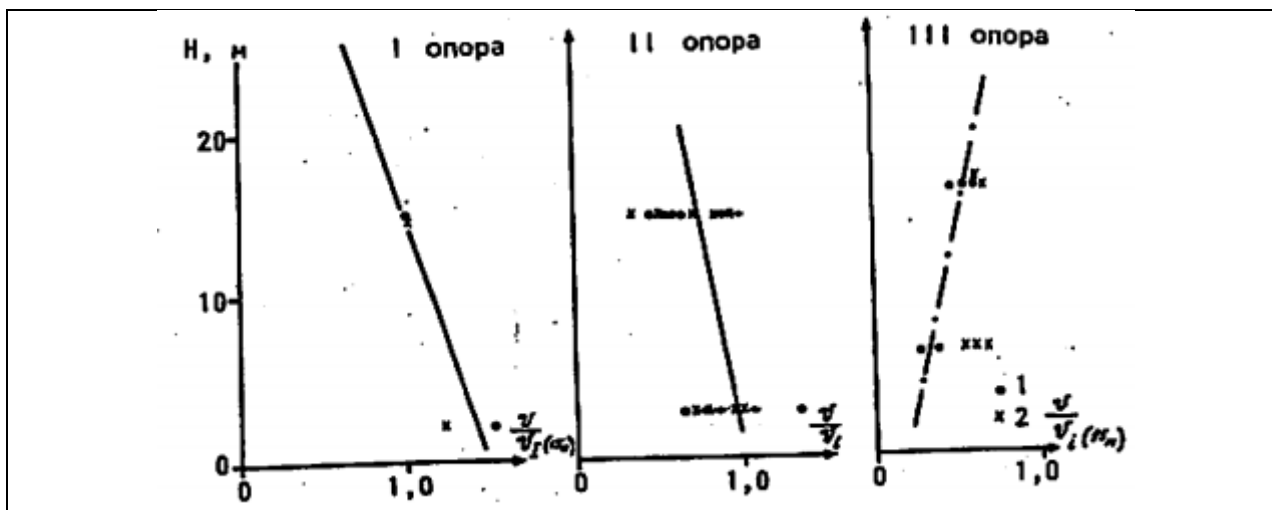


Рис.4. Деформация вертикального профиля скорости головной части воздушной волны. 1 - слабая лавина, 2 - средняя лавина

Fig.4. The deformation of the vertical velocity profile head of the air waves. 1 - weak avalanche, 2 - average avalanche

Данных по синхронным измерениям динамического напора и скорости недостаточно, чтобы построить осредненные профили плотности аэрозоля. Отметим лишь, что средняя плотность убывает в 3-5 раз на расстоянии порядка 100 м, в то время как толщина снежной пелены остается практически без изменения. Это означает, что убыль плотности происходит в основном из-за седиментации снежной пыли и ее диффузии внутри сформировавшейся снежной пелены, а не вследствие ее расширения.

Data on synchronous measurement of dynamic pressure and speed is not enough to build the averaged density profiles of aerosol. We only note that the average density decreases by 3-5 times at a distance of about 100 m, while the thickness of the snow veil remains virtually unchanged. This means that the density decrease is mainly due to the sedimentation of snow dust and its diffusion within the formed snowy shroud, and not because of its expansion.

Для практических приложений наибольший интерес представляет прогноз дальности действия снеговоздушной волны. Из приведенных экспериментальных данных видно, что путь затухания квадрата скорости равен $\frac{\lambda}{2} \approx 100$ м. Учитывая приведенные выше оценки об убывании-плотности, можно получить, что для типичных в данном очаге лавин динамический напор убывает в 10-20 раз на расстоянии в 100 м.

For practical applications, the most interesting range of the forecast snowair wave. From the experimental data show that the way of damping velocity squared equals $\lambda / 2 \approx 100$ m view of the above estimates of the decay-density, we find that the typical focus in this avalanche dynamic pressure decreases by 10-20 times at a distance of 100 m

Вопрос о возможности перенесения полученных результатов на другие, более мощные лавинные очаги следует разделить на две независимые, задачи. Первая состоит в определении начальных профилей плотности ρ и скорости v в присоединенной снеговоздушной волне как функций параметров лавинного потока. Вторая заключается в прогнозе динамики оторвавшейся волны и определении функций $\rho(x, y, z, t)$ и $v(x, y, z, t)$, по которым можно определить значение динамического напора в любой точке пространства и времени.

The possibility of transferring the results to other, more powerful avalanche centers should be split into two independent tasks. The first is to determine the initial density profiles ρ and velocity v in the attached snowair wave as functions of the avalanche flow. The second is to forecast the dynamics of detached waves and the definition of $\rho(x, y, z, t)$ and $v(x, y, z, t)$, which can determine the value of the dynamic pressure at any point in space and time.

В настоящее время экспериментальных данных недостаточно для построения расчетных моделей даже для простейших форм рельефа. Укажем лишь на возможность существования "масштабного эффекта" в этом явлении. Представляется довольно очевидным, что плотность снежного аэрозоля в присоединенной волне является функцией мощности лавины. Действительно, если для исследованных лавин построить график зависимости максимального динамического напора в функции квадрата максимальной скорости, то точки, изображающие лавины первой группы, имеют тенденцию группироваться около прямой, наклон которой со-

ответствует плотности $\rho_0^{(1)}|_{z=2-4\text{м}} = 10 \text{ кг/м}^3$, в то время как для более мощных лавин второй группы соответствующая плотность ближе к значению $\rho_0^{(2)}|_{z=2-4\text{м}} = 20 \text{ кг/м}^3$.

Currently, not enough experimental data to build computer models for even the simplest forms of relief. We only indicate the possible existence of "large-scale effect" in this phenomenon. It seems fairly obvious that the density of the snow aerosol attached wave is a function of the power of the avalanche. Indeed, if the investigated avalanches plot the maximum dynamic pressure as a function of the square of the maximum velocity, the points representing the avalanche of the first group tend to cluster around a straight line with a slope of which corresponds to the density $\rho_0^{(1)}|_{z=2-4\text{м}} = 10 \text{ кг/м}^3$, while for larger avalanches second group corresponding density closer to the value $\rho_0^{(2)}|_{z=2-4\text{м}} = 20 \text{ кг/м}^3$.

"Масштабный эффект" может также существовать и в динамике оторвавшейся волны. Убывание средней плотности кинетической энергии $\frac{1}{2}\overline{\rho v^2}$ снежного облака обусловлено рядом процессов, имеющих, вообще говоря, разные характерные масштабы времени. Действительно, как было показано, средняя скорость затухает с временным масштабом $\tau_1 = \frac{\lambda}{v_0}$, зависящим от сил лобового сопротивления и в меньшей степени от трения о подстилающую поверхность, а вообще говоря от средней плотности. В свою очередь, уменьшение плотности снежной пыли происходит из-за вовлечения чистого воздуха, диффузии пыли и ее седиментации. Каждый из этих процессов в основном определяется турбулентной энергией e которая убывает с характерным масштабом $\tau_2 = \frac{e}{\varepsilon}$, где ε - скорость диссипации турбулентной энергии. Третьим важным процессом, от которого зависит дальность распространения снеговоздушной волны, служит деформация поля средней скорости, обусловленная изменением знака касательного напряжения, и формирование новой системы крупномасштабных вихрей. Характерная постоянная времени этого процесса в соответствии с рис.4 может быть оценена как $\tau_3 \sim \left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)^{-1}$.

"Large-scale effect" may also exist in the dynamics of a torn wave. Decrease of the average kinetic energy density $\frac{1}{2}\overline{\rho v^2}$ snow clouds caused by a number of processes which have, in general, different time scales. Indeed, as has been shown, the average speed decays with a time scale $\tau_1 = \frac{\lambda}{v_0}$, depending on the force of drag, and to a lesser extent from the friction of the underlying surface, but in general the average density. In turn, the decrease in the density of snow dust is due to the involvement of clean air, dust diffusion and sedimentation. Each of these processes is mainly determined by the turbulent energy e which decreases with a scale $\tau_2 = \frac{e}{\varepsilon}$, where ε - dissipation rate of turbulent energy. The third important process that affects the propagation distance snowair wave deformation field is the average velocity due to a change of sign of shear stress, and a new system of large-scale vortices. The characteristic time constant of the process in accordance with Figure 4 can be estimated as $\tau_3 \sim \left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)^{-1}$.

В наших экспериментах для лавин сравнительно небольших размеров постоянные времени τ_1 , τ_2 , τ_3 имеют одинаковый порядок. Однако вполне вероятно, что для лавин больших размеров процесс "сворачивания" присоединенной снежной волны в систему кольцевых вихрей может завершаться быстрее, чем затухание средней кинетической энергии. По известным аэродинамическим законам, - такая вихревая структура существует дольше и, соответственно, по сравнению со структурно неорганизованным снежным облаком имеет большую дальность действия. Например, в работе [1] по экспериментальному исследованию движения вихревых колец показано, что в определенных условиях такое кольцо проходит расстояние, превышающее 12 его радиусов, без сколько-нибудь заметного замедления.

In our experiments, for avalanches relatively small time constants τ_1 , τ_2 , τ_3 have the same order. However, it is likely that large avalanches process of "folding" of the associated wave of snow in the ring vortices can exit faster than the decay of the average kinetic energy. On known aerodynamic laws - such a vortex structure has been around longer, and, respectively, compared with structurally disorganized snow cloud has a longer range. For example, in [1] for a pilot study of the motion of vortex rings show that in certain circumstances, such a ring is a distance greater than 12 of its radii, without any noticeable delay.

ЛИТЕРАТУРА

1. Владимиров В.А., Тарасов В.Ф. Формирование вихревых колец. --Изв.Сибирск.отделения АН СССР, сер.техн.наук, № 3, вып.1, 1981, с.3-11.
2. Григорян С.С., Урумбаев Н.А. О природе воздушной волны. - Тр.Ин-та механики МГУ, If 42. М., 1975, с.74-82. •
3. Москалев Ю.Д. Динамика снежных лавин и снеголавинные расчеты. - Тр.САРНИГМИ, вып.

36 (117), 1977, 230 с.

4. Тушинский Г.К. Лавины, возникновение и защита от них. М., Географгиз, 1949, 213 с.
5. Урумбаев Н.А. Результаты исследований природы и деятельности лавинных воздушных волн. - Тр.САРНИГМИ, вып.15(96), 1974, с.31-38.
6. Урумбаев Н.А. Определение давления, скорости и плотности лавинной воздушной волны.- Вестн.МГУ, география, 1974, р 3, с.65-72.
7. Урумбаев Н.А., Струков Б.Б. Экспериментальный комплекс для телеметрического изучения параметров движущейся лавины. - Тр.ВГИ, вып.49, 1980, с.21-29.
8. Якимов Ю.Л., Шурова И.Е. Природа воздушной волны, вызванной снежной лавиной. – В сб.: Успехи советской гляциологии. Материалы Третьего всес.гляциол.симпозиума. Фрунзе, 1968, с.355-358.
9. Allera J.L., Bon-Mardion G. et al. La dynamique des avalanches d'après les résultats des expériences de déclenchement artificiel au Lautaret. - Houille blanche. v.31, » 6-7, 1976, p.489-S01.
10. Grigorian S.S. Mechanics of snow avalanches. - Proc.of the Grindelwald Symposium, April 1974. Intern.Assoc.Hydrol.Sci., Publ. № 114, 1975, p.355-368.

REFERENCES

1. Vladimirov, VA, VF Tarasov Formation of vortex rings. - Math. Sibirsk.otdeleniya USSR, ser.tehn.nauk, № 3, Issue 1, 1981, p.3-11.
2. SS Grigoryan, Urumbayev NA The nature of the air waves. - Tr.In of Mechanics MSU If 42. M., 197S, p.74-82. •
3. Moskalev YD The dynamics of avalanches and avalanche calculations. - Tr.SARNIGMI, no. 36 (117), 1977, 230 p.
4. Tushino GK Avalanches, appearance and protection. M. Geografiz, 1949, 213 p.
5. Urumbayev NA The results of research on the nature and activities of the avalanche air waves. - Tr.SARNIGMI, issue 15 (96), 1974, p.31-38.
6. Urumbayev NA The pressure, velocity and density of the avalanche air waves. - Vestn.MGU, Geography, 1974, p 3, p.65-72.
7. Urumbayev NA, BB Strukov Experimental setup for telemetry study of the parameters of the moving avalanche. - Tr.VGI, vyp.49, 1980, p.21-29.
8. Yakimov YL, IE Shurova The nature of the air waves, caused by an avalanche. - In Sat: Progress Soviet glaciology. Proceedings of the Third vses.glyatsiol.simpoziuma. Frunze, 1968, s.355-358.

МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ ВОЛН ЛАВИН ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ИХ ПАРАМЕТРОВ

Статья поступила в редакцию 26 мая-1981 г.

L.A.Suhanov

MECHANISM OF THE AIR WAVES AVALANCHES ON THE RESULTS OF FIELD MEASUREMENT OF THEIR PARAMETERS

Received May 26, 1981

Параметры воздушных волн лавин, измеренные на экспериментальном очаге Эльбрусской станции МГУ [4], позволяют представить механизм их образования и структуру, которые подтвердились нашими опытами по моделированию воздушной волны с помощью порошкообразных материалов. Однако, объем и точность результатов натурных измерений недостаточны для однозначного ответа на некоторые вопросы, а опыты с моделированием носили качественный характер.

Parameters of the air waves of avalanches, measured on an experimental hearth Elbrus station MSU [4] allow to present the mechanism of their formation and structure, which were confirmed by our experiments on modeling the air waves using a powder. However, the amount and accuracy of the results of field measurements are insufficient for a clear answer to some questions, and experiments with the simulation were qualitative.

Если под термином "воздушная волна лавин" понимать всю совокупность аэродинамических процессов, сопровождающих сход лавин от момента их срыва до восстановления в окружающем пространстве исходного метеорологического режима, то весь процесс образования и распространения воздушной волны лавин можно разбить на три основных стадии.

Первая стадия - подготовительная (рис.1).

If the term "air wave avalanche" to understand the totality of aerodynamic processes accompanying avalanches from the time of their failure to restore the original in the surrounding meteorological conditions, the whole process of the formation and distribution of air wave avalanches can be divided into three main stages.

The first phase - preparation (Fig. 1).

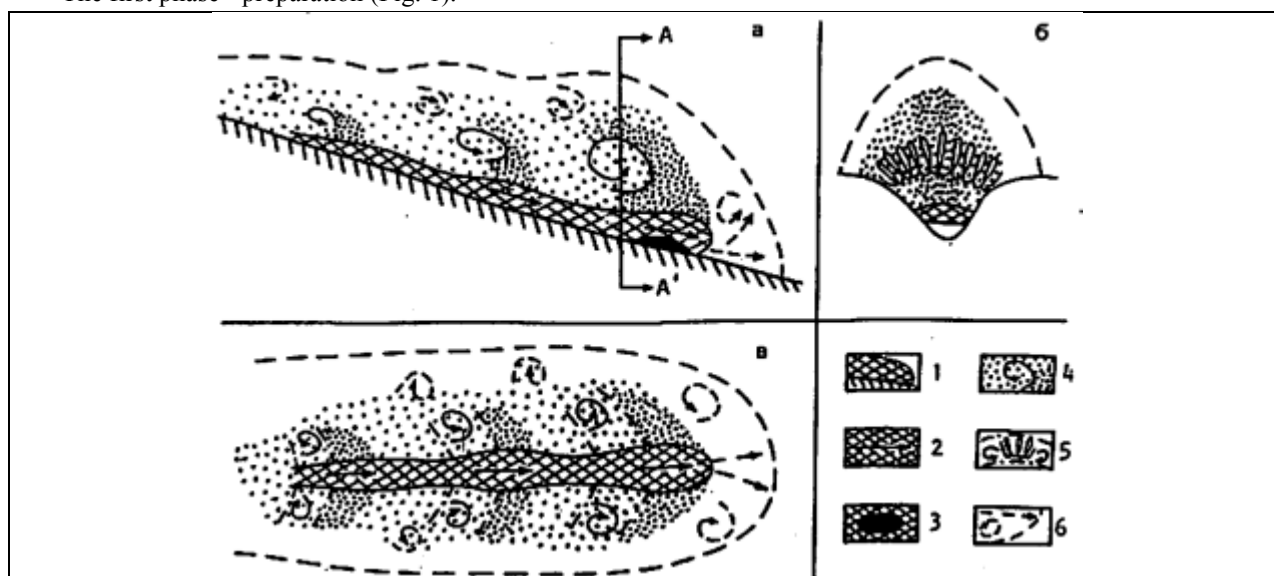


Рис. 1. Схема образования воздушной волны лавины. Первая стадия формирования спутного потока: а/ сечение по продольно оси, б/ поперечное сечение по AA, в/ сечение параллельно склону на малой высоте от него. 1 – лавинный снег, 2 и 3 – области повышенных и пониженных скоростей движения лавинного снега, 4 – снеговоздушный поток, вихри, струи, области повышенной плотности в нем, 5 – границы вихрей снеговоздушного потока, 6 – вихри и граница приведенного в движение чистого воздуха.

Fig. 1. Scheme of the air wave avalanche. The first stage of a cocurrent flow: a / cross-section along the longitudinal axis, w / cross-section along AA in / section parallel to the slope at low altitude from it. 1 - snow avalanche, 2 and 3 - areas of high and low speeds avalanche of snow, 4 - snowair flow vortices, the jet area of increased density in it, 5 - border snowair vortex flow, 6 - vortices and the boundary set in motion by the Clean Air .

Образование спутного потока воздуха, насыщение его снегом, рост объема происходит от начала движения снега в лавиносборе до начала интенсивного торможения лавины. Спутный поток воздуха обра-

зается из-за вязкости воздуха вокруг любого движущегося тела и состоит из трех основных зон: первая - зона уплотнения воздуха перед телом, где продольная составляющая скорости движения воздуха увеличивается от нуля до скорости тела у его поверхности V_T ; вторая - зона пограничного слоя вдоль боковой поверхности тела, в которой скорость движения воздуха меняется от V_T у поверхности тела до нуля и $1/2 V_T$ на некотором удалении от нее, где воздух движется в направлении, обратном движению тела, перетекая из зоны уплотнения; третья - зона частичного разрежения и турбулентного следа за телом, где продольная скорость воздуха довольно быстро падает до нуля по мере удаления от тела.

Formation of cocurrent flow of air saturation of its snow, growth occurs from driving snow avalanche catchment before the braking avalanche. Cocurrent flow of air is formed due to the viscosity of air around any moving body, and consists of three main areas: the first one - the zone of air before sealing the body, where the longitudinal component of the air velocity increases from zero to the speed of the body at its surface V_T ; second - zone boundary layer along the side of the body, in which the air velocity changes from V_T at the surface of the body to the ground and half V_T at some distance from it, where the air is moving in the direction opposite to the movement of the body, flowing from the zone of compression, and the third - the zone of partial dilution and turbulent wake behind the body, where the longitudinal air velocity quickly drops to zero as the distance from the body.

Геометрические параметры спутного потока зависят также от поперечных и продольных размеров тела, шероховатости его поверхности, скорости и продолжительности движения, если оно нестационарное. С ростом последних геометрические параметры спутного потока возрастают. Кроме того, в лавинах из сухого снега, как и при движении пылевидных порошков, объем спутного потока увеличивается в результате перехода в воздух все новых и новых порций снега, передающих потоку свою кинетическую энергию и увеличивающих его плотность. Этот процесс можно считать эквивалентным резкому увеличению шероховатости и площади поверхности движущегося тела. При этом за головной, утолщенной частью лавины образуется вихрь, возможно, с аркообразной осью [5], который откатывается к хвосту лавины, уступая место для образования нового вихря и способствуя образованию волн на поверхности лавины, подобных волнам на поверхности воды или барханам песчаной пустыни.

The geometrical parameters of cocurrent flow also depends on the transverse and longitudinal dimensions of the body, the surface roughness, speed and duration of the movement, if it unsteady. As the last geometrical parameters cocurrent flow increases. In addition, the avalanche of dry snow, like the motion of dust powders, cocurrent flow volume increases as a result of the transition to the air more and more servings of snow, will be streamed their kinetic energy and increasing its density. This process can be considered equivalent to a sharp increase in surface roughness and surface area of the moving body. Thus for the head, the thickened part of the storm vortex is formed, possibly with arcuate axis [5], which is rolled back to the tail of the avalanche, giving way for the formation of a new vortex and contributing to the formation of waves on the surface of the avalanche, like waves on the surface of water or sand dunes of the desert.

Переход части лавинного снега в поток, как и песка с барханов в пустыне [2], происходит главным образом с передних, "наветренных" склонов волн и их вершин, причем наиболее интенсивно этот процесс идет в головной части лавины, где градиенты скорости движения воздуха максимальны. На тыльных склонах происходит частичное оседание снега. По своей структуре снеговоздушный спутный поток лавин, называемый в некоторых работах "аэрозольной составляющей лавины", состоит из нескольких сравнительно тонких слоев снеговоздушной смеси повышенной плотности, присоединенных к вершинам волн и к головной части лавины, и более толстых слоев пониженной плотности с вихрями, наклоненных под острым углом к поверхности лавины в сторону, противоположную ее движению, и охватывающих ее в верхней полуплоскости. На фотографиях, сделанных французскими исследователями внутри такого потока [6], и на наших фотографиях, полученных при моделировании воздушной волны порошками, подобная структура выглядит как грива пыли с нечетко выраженными полосами, как бы относимая ветром назад. Снеговоздушный поток описанной структуры в свою очередь охвачен слоем чистого воздуха, скорости движения которого выше нуля, но недостаточны для поддержания во взвешенном состоянии даже самых мелких частиц снежной пыли. Это не относится к слою уплотненного воздуха перед головной частью лавины с нарастающими скоростями, который, очевидно, поднимает снег, лежащий на пути движения лавины на небольшую высоту. Такой снег тут же включается в ядро лавины и в присоединенный к нему уплотненный слой снеговоздушного потока.

The transition of the avalanche of snow in the stream, as well as sand dunes in the desert [2], is mainly from the front, "windward" wave slopes and peaks, the most intense, this process is at the head of the avalanche, where the gradients are maximum air velocity. On the back of the slopes are partially settling snow. In its structure snowair cocurrent flow avalanches, called in some papers "of the aerosol component of the avalanche," consists of several

relatively thin layers snowair mixture of high density, attached to the tops of the waves and to the head of the avalanche, and thicker layers of low density with vortices inclined at acute angle to the surface of an avalanche in the opposite direction of its movement, and covering it in the upper half. Photographs taken by French explorers in such flow [6], and our photographs obtained in the simulation of an air wave powders, such a structure looks like a mane dust lanes clearly marked as attributable to wind back. Snowair flow described structure, in turn, covered by a layer of clean air speed is higher than zero, but not enough to maintain the suspended state, even the smallest particles of snow dust. This does not apply to the layer of compacted air to the head part of the avalanche with increasing speed, which obviously raises the snow lying in the path of an avalanche at a low height. Such snow immediately incorporated into the core of the avalanche and attached to it snowair packed bed flow.

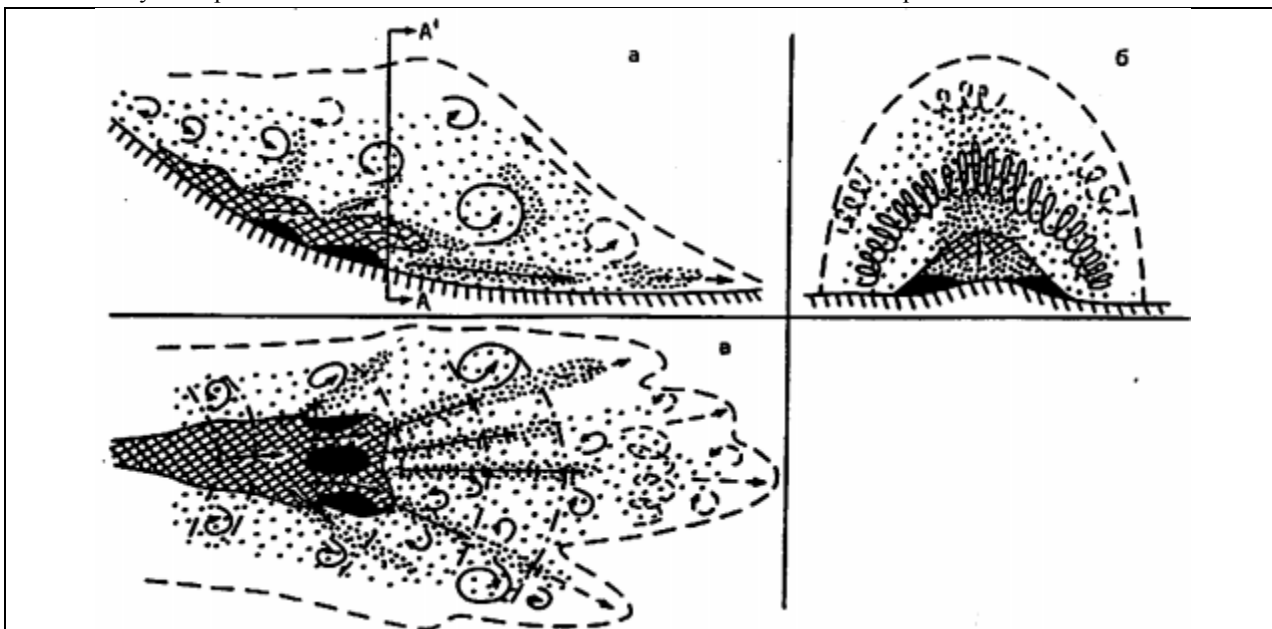


Рис.2. Схема образования воздушной волны лавин. Вторая стадия, кульминационная: инерционный отрыв спутного потока, выброс струй снеговоздушной смеси. Условные обозначения см. на рис.1

Fig.2. Scheme of the air wave avalanches. The second stage, culminating: inertial separation cocurrent flow, jet ejection snowair mixture. Symbols refer to Figure 1

Вторая стадия образования воздушной волны лавин - кульминационная (рис.2). Происходит инерционный отрыв спутного потока, выброс струй снеговоздушной смеси и, возможно, возникновение ударной волны, т.е. скачка уплотнения, распространяющегося со скоростью звука. Это длится от начала интенсивного торможения лавинного снега до остановки его последних порций или до начала следующего цикла ускоренного движения этих порций. Последнее наблюдается в случае, если на пути движения лавины кроме конуса выноса есть промежуточные участки, где возможно интенсивное торможение лавинного снега: резкие выполаживания склона или участки склона той же крутизны после больших, уступов резкие повороты лотка и т.д. При выходе лавинного снега на участок торможения снеговоздушный поток, имеющий большую плотность и массу и значительно меньший коэффициент трения, чем лавинный снег, продолжает двигаться, постепенно теряя свою скорость и слоисто-вихревую структуру. Движение такого потока, оторвавшегося от лавинного тела на высоте, равной его толщине, можно было бы рассматривать как движение свободной, так называемой "затопленной" струи, по крайней мере до тех пор, пока нижняя граница такой струи, имеющей угол расхождения в пределах $13-17^\circ$ [1], не коснется поверхности склона, а далее - как движение импульсной струи вдоль его поверхности.

The second stage of the formation of an air wave avalanches - the culmination (Fig. 2). Is inertial separation cocurrent flow, jet ejection snowair mixture and possibly a shock wave, shock wave that propagates at the velocity of sound. It lasts from the beginning of the braking avalanche of snow to stop him last portions or before the next round of accelerated motion of the portions. Last seen when in the path of an avalanche than alluvial fan with intermediate areas where intensive braking possible avalanche of snow: sharp flattening of the slope of the land, or the steepness of the slope of the same after the big, shoulders tight turns tray, etc. When you exit the avalanche of snow on the area braking snowair stream having a high density and weight and significantly lower coefficient of friction than the avalanche snow continues. Move, gradually losing his speed and layer-vortex structure. The movement of such a flow, cut off from the avalanche body at a height equal to its thickness, can be regarded as free movement, the so-called "flooding" of the jet, at least for as long as the lower boundary of a jet having a divergence

angle in the range 13 - 17 ° [1], do not touch the surface of the slope, and then - as the movement of the pulse jet along its surface.

Однако такое определение будет неполным, если не учитывать специфических эффектов, возникающих при интенсивном торможении больших масс лавинного снега. Эти эффекты, с одной стороны, могут дать существенный дополнительный импульс, поддерживающий или даже увеличивающий в течение короткого времени скорость спутного потока, по крайней мере в его нижних слоях, а с другой стороны, способствуют более быстрому разрушению описанной структуры спутного потока. Можно указать два таких эффекта, вероятно, возникающих в лавинном теле вследствие неравномерного торможения отдельных масс лавинного снега, которые условно назовем "прибойным" и "струйным", или "щелевым".

However, this definition is incomplete, unless you consider the specific effects that occur when heavy braking of large masses of snow avalanche. These effects, on the one hand, can give a significant impetus, maintain, or even increase in the short time the rate of cocurrent flow, at least in its lower layers, and on the other hand, contribute to a more rapid destruction of the described structure cocurrent flow. You can specify two of these effects are likely to occur in the body due to the avalanche of uneven braking individual masses avalanche of snow, let's call that "surf" and "jet" or "slot".

Первый эффект, возникающий вследствие более интенсивного торможения нижних слоев лавинного снега по сравнению с верхними, приводит к тому, что при выходе на участок интенсивного торможения головная часть лавины принимает форму, характерную для прибойных морских волн (см.рис.2а). Забегающие вперед верхние слои снега образуют под собой большую воздушную полость и в последний момент обрушиваются в нее, резко вытесняя оттуда воздух сильными кратковременными струями, захватывающими большое количество снежной пыли и веерообразно распространяющимися вперед и в стороны вдоль самой поверхности склона. Такое обрушение эквивалентно первым мгновениям падения лавины с уступа и, вероятно, может сопровождаться образованием ударных волн типа взрывных, распространяющихся со скоростью звука. Однако в нашем случае такие волны не наблюдались.

The first effect, arising from a more intense inhibition of the lower layers of snow avalanche over the top, leads to the fact that in entering the braking portion of the avalanche head part takes the form of characteristic surf the waves (Fig. 2). Forerunning upper layers of snow formed by a large air cavity at the last moment descend into it, displacing the air dramatically strong transient jets, a large number of spectacular snow dust and fan-propagating forward and sideways along the surface of the slope. Such a collapse is equivalent to the first moments of falling avalanche from the ledge and can probably be accompanied by the formation of shock waves of the explosion propagating at the speed of sound. However, in our case, these waves were observed.

Основой второго эффекта, также приводящего к образованию кратковременных струй снеговоздушной смеси, может служить неравномерное торможение масс лавинного снега в поперечном и продольном направлениях. При этом лавинный снег, еще продолжающий двигаться в задних частях тела лавины с большой скоростью, вдавливается в "щели" между отдельными интенсивно тормозящимися передними массами снега, ускоряясь в них, как в сужениях канала, и временно размывая их стенки. Вероятно, через такие щели происходит выжимание воздуха из лавинного снега при его остановке и уплотнении, так как давление в них меньше, чем в окружающих массах снега с меньшей скоростью движения, что и приводит к выбросу кратковременных струй снеговоздушной смеси в местах выхода этих щелей на поверхность лавинного снега. Скорости этих струй могут быть значительно выше скорости лавины и ее спутного потока, и вокруг каждой из них образуются местные турбулентные вихри.

The basis of the second effect, which also leads to the formation of transient jets snowair mixture can serve as uneven braking mass avalanche of snow in the transverse and longitudinal directions. In this avalanche of snow, still continues to move in the back of the body of the avalanche at high speed, is pressed into the "gap" between the individual intensely inhibitory front masses of snow, accelerating in them, as in the narrower channel, and temporarily diluting their wall. Perhaps through these cracks is squeezing the air out of the avalanche of snow at its stop and seal, as the pressure in them is less than the surrounding mass of snow with less speed, which leads to the release of short jets snowair mixture in these places where the cracks on the surface avalanche snow. The velocities of these jets can be much higher than the speed of the avalanche and cocurrent flow, and around each of them formed the local turbulent eddies.

Совокупность описанных струй поддерживает движущийся по инерции спутный поток лавины, "подстилая" его снизу и одновременно разрушая его слоисто-вихревую структуру, сформировавшуюся при движении лавины по лотку, и образует вместе с ним характерный фестончатый в плане и клинообразный в продольном вертикальном сечении передний фронт воздушной волны. Следы движения таких струй хорошо видны на фотографиях "лавинных" отложений при моделировании лавин порошками в виде вытянутых

треугольничков, веерообразно отходящих вперед и в стороны от передней линии остановки основной массы материала.

Described a set of jets supports moving by inertia cocurrent flow of the avalanche, "sub-genres" of its bottom and at the same time destroying its layer-vortex structure, formed by the motion of an avalanche chute, and forms with it a characteristic scalloped in plan and wedge-shaped in longitudinal vertical section of the leading edge of the air wave. Traces the movement of such jets are clearly visible in the photographs, "avalanche" of deposits in modeling avalanches powders in the form of elongated triangles, fan on and off to the side from the front of the stop line bulk material.

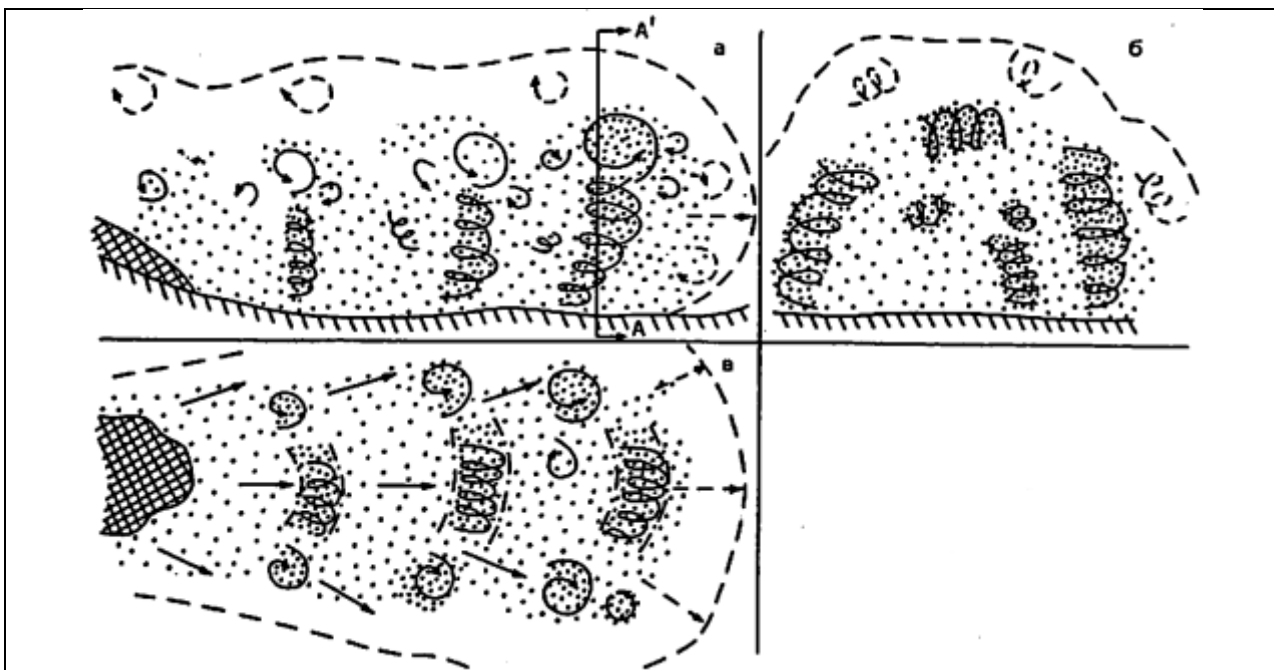


Рис.3. Схема образования воздушной волны лавины. Третья стадия: инерционное движение, рассеяние снеговоздушного потока, седиментация снежной пыли. Условные обозначения см. на рис. 1.

Fig.3. Scheme of the air wave avalanche. Third stage: inertial motion, scattering snowair stream sedimentation snow dust. Symbols shown in Fig. 1.

Третья, заключительная стадия (рис.3) существования воздушной волны лавин - инерционное движение снеговоздушного потока, разрушение вихрей, седиментация снежной пыли - протекает от момента прекращения движения в лавинном снеге до полного прекращения движения воздуха, вызванного сходом лавины. При этом вряд ли имеет место трансформация аркообразных вихрей спутного потока, охватывавших лавину, в кольцеобразные вихри, подобные изучавшимся Р.Вудом [3], и способные к сверхдальному распространению без заметного затухания. В таких вихрях циркуляционная скорость совпадает с поступательной в его центральных областях, а на периферии противоположна ей. Это создает эффект качения вихря по подстилающей поверхности и по трубе из неподвижного воздуха, чем и обуславливается малое затухание такого вихря. В случае аркообразных лавинных вихрей подстилающая поверхность рассекает их в зоне максимальных скоростей, создавая интенсивное торможение вихря и испытывая его максимальное воздействие. При этом аркообразный вихрь скорее всего разрывается наверху и превращается в два вертикальных, кратковременных вихря, подобных смерчу. Кольцевые вихри могут образовываться вокруг описанных выше кратковременных струй, однако размеры их должны быть значительно меньше поперечных размеров лавины и, следовательно, дальность распространения их также относительно невелика.

The third and final stage (Fig.3) the existence of an air wave avalanches - inertial motion snowair flow vortex breakdown, sedimentation snow dust - proceeds from the termination of the movement in the avalanche snow until no air movement caused by avalanches. In this case, it is hardly a place transformation arcuate cocurrent flow vortices, covering an avalanche in the ring-shaped vortices similar R.Vudom were studied [3], and capable of ultra-long-proliferation without noticeable attenuation. In these eddies circulating velocity coincides with the translational in its central areas, as opposed to the periphery of it. This has the effect of rolling the vortex of the underlying surface and the pipe from the still air, and this is due to low attenuation of the vortex. In the case of avalanche arcuate vortices underlying surface cuts into the zone of maximum velocity, creating a vortex intensive braking and experiencing its maximum impact. In this whirlwind of arcuate likely broken at the top and turns into two vertical,

short vortex, like a tornado. Ring vortices can form around the above short-jets, but their size should be much smaller than the transverse dimensions of the avalanche, and therefore, the range of their distribution is also relatively small.

По мере продвижения снеговоздушного облака скорости движения воздуха в нем уменьшаются и из облака выпадают сначала массивные частицы снега, а потом все более мелкие. Количество выпавшего снега наибольшее вдоль направлений распространения струй, обладающих максимальной несущей способностью, и быстро уменьшается с удалением от линии остановки лавинного снега. Плотностная структура снеговоздушного облака в период деградации явно неоднородна: максимумы плотности приходятся, вероятно, на вихревые образования, в которых движения воздуха затухают значительно медленнее, чем в остальном объеме снеговоздушного облака. При этом вертикальные вихри могут выносить снег в верхние слои снеговоздушного облака, поддерживая там высокую плотность в течение некоторого времени даже после того, как снег из нижних слоев этого облака уже выпал. Выпадение снега из верхних слоев облака происходит после разрушения вертикальных вихрей практически при нулевых скоростях движения облака и в основном на его периферии.

As we move snowair cloud velocity of air in it and decrease drop out of the clouds at first massive particles of snow, and then more and more shallow. Snowfall along the direction of the largest jets, with a maximum possible load, and decreases rapidly with distance from the stop line avalanche of snow. snowair cloud density structure during degradation clearly heterogeneous: density maxima occur probably in the vortex formation, in which the air flow decay much more slowly than in the rest of the volume snowair clouds. In this case, the vertical vortices can make snow in the upper snowair clouds, supporting high density there for some time even after the snow from the lower layers of the cloud has already fallen out. Snowfall from the upper cloud occurs after the destruction of the vertical vortex practically zero velocities clouds and mostly on the periphery.

Описанная схема образования и распространения воздушной волны лавин полностью соответствует всем зафиксированным особенностям временных и пространственных изменений параметров снеговоздушного потока [4]. Пульсации на графиках давления $P(t)$ скорости $V(t)$, плотности $\rho(t)$, быстрые изменения формы высотных профилей этих параметров - свидетельство прохождение слоев снеговоздушной смеси разной плотности и вихрей, сначала крупных, с временным размером 3-7 сек - $1/3$ постоянной времени затухания аппроксимирующей экспоненты [4], потом все более мелких - слабые зигзагообразные профили. Клинообразные и S-образные зеркальные высотные профили P , V , ρ в первые моменты времени являются свидетельством двухэтажной структуры снеговоздушного потока: сверху спутный поток, внизу - струи. Клинообразный передний фронт снеговоздушного потока, наиболее скорости на второй мачте свидетельствуют о наличии струй у нижней границы лавинных отложений. Максимальная крутизна переднего фронта графиков $V(t)$ 12 м/с^2 , близкая с учетом ошибок к ускорению свободного падения, вероятно, свидетельствует о гравитационном механизме образования этих струй, т.е. прибойном эффекте. Наконец, значительные плотности снеговоздушного потока в верхних слоях при низких скоростях, когда в нижних уже практически находится чистый воздух, подтверждают наличие вихревого механизма.

This scheme of formation and propagation of an air wave avalanches meets all fixed characteristics of temporal and spatial changes in the parameters snowair flow [4]. Ripple on the charts of pressure $P(t)$ the velocity $V(t)$, the density $\rho(t)$, rapid changes in the shape of the vertical profiles of parameters - witness the passage of the mixture snowair layers of different densities and vortices, first largest, with 7.3 times the size of $s - 1/3$ decay time constant approximating exponent [4], then more and more small - weak zigzag profiles. Wedge-shaped and S-shaped mirror altitude profiles of P , V , ρ in the first moments of time are evidence of a two-story structure snowair stream: cocurrent flow above, below - the jet. Wedge-shaped leading edge snowair flow, maximum speed on the second mast indicate the presence of the jets at the lower end of avalanche deposits. The maximum slope of the leading edge graphs $V(t)$ 12 m/s^2 for errors close to the acceleration of free fall, probably indicates the gravitational mechanism of these jets, undertow effect. Finally, significant density snowair flow in the upper layers at low speeds, when the bottom is almost is clean air, confirm the presence of the vortex mechanism.

Систематические натурные измерения параметров воздушной волны лавин даже на одном очаге позволили впервые получить реальные количественные значения этих параметров и выявить важные динамические характеристики снеговоздушного потока лавин, которые необходимо учитывать при оценках разрушительного воздействия воздушной волны лавин на сооружения и растительность.

Systematic field measurements of parameters of the air waves of avalanches even allowed to focus on one for the first time to get real quantitative values of these parameters and identify the important dynamic characteristics snowair flow avalanches, which must be considered when assessing the damaging effects of air wave avalanches on structures and vegetation.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамович Т.Н. Теория турбулентных струй. М., Физматгиз, 1960, 715 с.
2. Бютнер Э.К. Динамика приповерхностного слоя воздуха. Л., Гидрометеиздат, 1978, 158 с.
3. Сибрук В. Роберт Вуд. М., "Наука", 1980, 320 с.
4. Суханов Л.А., Холобаева С.П. Воздушная волна снежных лавин в свете натурных измерений ее параметров. - Опубликовано в наст.сборнике.
5. Якимов Ю.Л., Шурова И.Е. Природа "воздушной волны", вызванной снежной лавиной, В сб.: Успехи советской гляциологии. Фрунзе, 1968, с.355-358.
6. Allera I.L., Bon-Mardion G., Egbert-Berard A., Guelff C., Mura R., Perroud P.,Rey. La dynamique des avalanches d'après les resultats des experiences de deckenchement artificiel au Lautaret. - Houille Elanche, v.31, № 6, 1976, p.488-501.

REFERENCES

1. Abramovich TN The theory of turbulent jets. Fizmatgiz, Moscow, 1960, 715 p.
2. Buttner EK The dynamics of the surface layer of air. Gidrometeoizdat, 1978, 158 p.
3. Seabrook W. Robert Wood. Moscow, "Nauka", 1980, 320 p.
4. Sukhanov, LA, SP Holobaeva Air wave of avalanches in the light of in-situ measurements of its parameters. - Posted nast.sbornike.
5. Yakimov YL, IE Shurova The nature of the "air waves" caused by snow avalanches, Sat: Progress Soviet glaciology. Frunze, 1968, s.355-358.

Многолетние исследования воздушных волн, образованных лавинами „Приэльбрусья, показали, что они в основном представляют собой снеговоздушный поток сложной структуры, движущийся по инерции в течение некоторого времени после остановки лавины [1-3]. Для получения количественных данных о разрушительном потенциале такого потока, о характере и пределах изменений во времени и пространстве его параметров Проблемной лабораторией снежных лавин и селей географического факультета МГУ совместно с Институтом механики МГУ на Эльбрусской станции МГУ был построен телеметрический комплекс, разработанный Н.А.Урумбаевым и Б.Б.Струковым [4]. В настоящей работе анализируются результаты измерений на этом комплексе в 1977-1980 гг., выполненные в лавинном очаге со следующими параметрами: превышение высот 1000 м, средний угол наклона 30°, объем лавин от 10 до 50 тыс.м³ [3].

Long-term studies of air waves formed by avalanches "Elbrus, have shown that they are basically snowair flow complex structure, moving by inertia for some time after stopping the avalanche [1-3]. To obtain quantitative data on the destructive potential of such a flow, the nature and extent of the changes in time and space of its parameters Problem Laboratory of avalanches and mudslides geographical faculty of Moscow State University and the Institute of Mechanics, Moscow State University on Elbrus station was built telemetry complex developed N.A.Urumbaevym B.B.Strukovym and [4]. This paper analyzes the results of measurements on this complex in 1977-1980. Performed in avalanche focus with the following parameters: exceeding 1000 m, the average angle of 30 °, the amount of avalanches from 10 to 50 m³ [3].

Комплекс представляет собой совокупность вертушечных датчиков скорости, тензометрических датчиков скоростного напора, т.е. давления снеговоздушного потока лавин и регистрирующей аппаратуры - пятиканальных самописцев напряжения с перьевой записью. Датчики установлены на трех измерительных мачтах на высотах от 2 до 19,5 м в зоне действия снеговоздушного потока, создаваемого одной из лавин, регулярно сходящих с северного склона горы Чегет. Они связаны многожильным кабелем длиной около 300 м с регистрирующей аппаратурой, размещенной в лабораторном корпусе Эльбрусской станции МГУ. Первая мачта комплекса расположена на конусе выноса в области нижней границы остановки лавинного снега, две другие - на расстояниях 70 и 120 м от нее вдоль основного направления снеговоздушного потока, перпендикулярного к оси долины. С этим же направлением совпадают и продольные оси датчиков, жестко укрепленных на мачтах. Таким образом, комплекс регистрирует только продольную, горизонтальную составляющую скорости и давления потока. Комплекс автоматически включается от инерционных датчиков включения, установленных на передней оттяжке первой мачты и в 20 м от нее, а выключается через 40-60 секунд после включения - это предельное время действия снеговоздушного потока данной лавины.

The complex is a set of spinner speed sensors, strain gauges ram, snowair pressure flow avalanches and recording equipment - five-voltage pen recorders record. The sensors are mounted on the three measuring masts at heights of 2 to 19.5 m in range snowair flow created one of avalanches regularly coming down from the northern slope of Mount Cheget. They are associated multicore cable length about 300 m with recording equipment placed in the laboratory building Elbrus station MSU. The first tower of the complex is located on the alluvial fan of the lower limit stop an avalanche of snow, the other two - at distances of 70 and 120 m from the main direction along snowair flow perpendicular to the axis. Valleys. With the same direction and the same longitudinal axis sensors, rigidly mounted on masts. Thus, the set of registers only the longitudinal, horizontal component of velocity and pressure flow. Complex automatically from the inertial sensors enable mounted on the front of the mast and procrastination first 20 meters of it, and turns off after 40-60 seconds after the - is limiting the duration of the flow snowair avalanche.

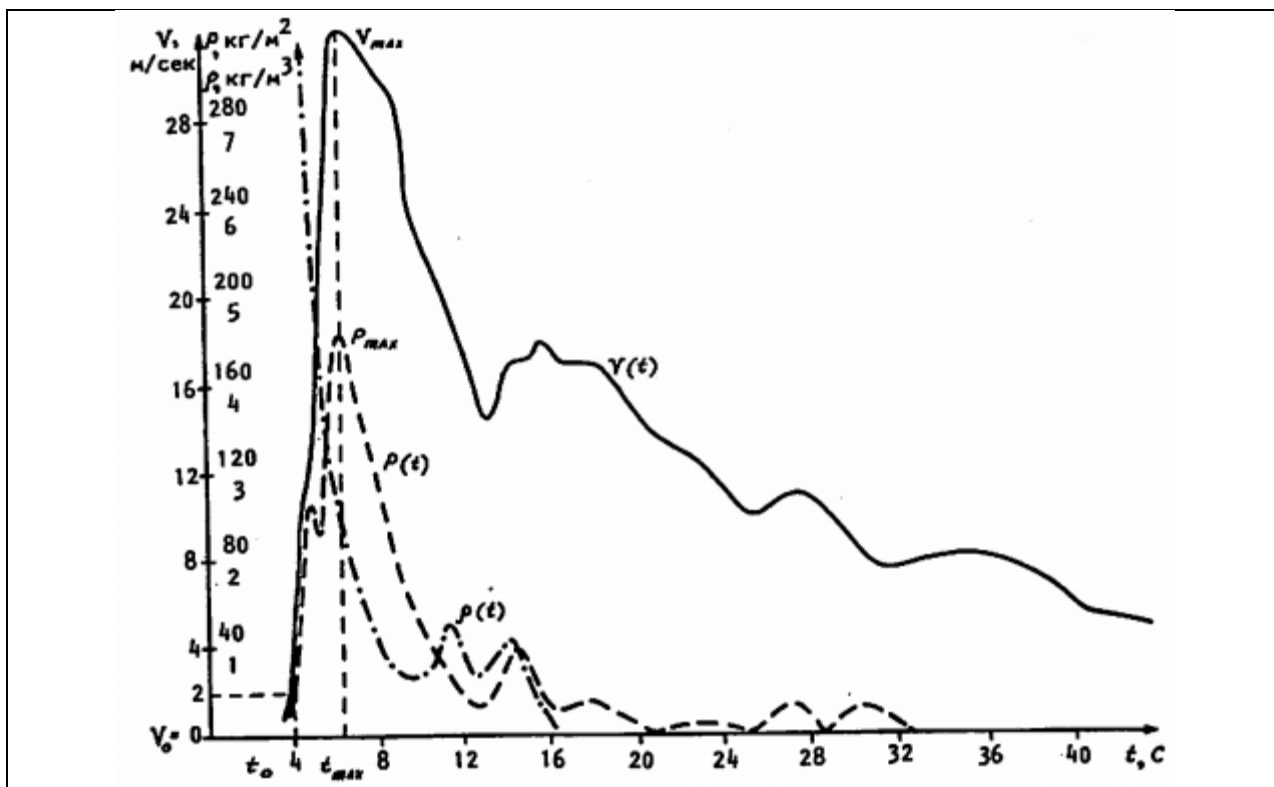


Рис.1. Типичные графики изменений во времени скорости V , давления P , плотности ρ , снеговоздушного потока лавины. Лавина 9 апреля 1980 г., 10 час. 30 мин, вторая мачта, высота 4,5 м.

Fig.1. A typical graph of change over time speed V , the pressure P , density ρ , snowair flow avalanches. Avalanche of April 9, 1980, 10:00. 30 minutes, the second tower, the height of 4.5 m

За три зимних сезона 1977-1980 гг. на комплексе зарегистрировано 18 лавин и получено 57 записей изменений во времени давления P и 79 записей скорости V снеговоздушного потока. Типичные графики таких записей представлены на рис.1. Здесь же приведен график плотности ρ снеговоздушного потока, рассчитанный по данным значениям P и V с помощью формулы $\rho(t) = \frac{2P(t)}{gV^2(t)}$, где g - ускорение свободного падения.

In the three years 1977-1980 winter season. on a set of avalanches and registered 18 received 57 records of changes in time pressure, P , and 79 speed records V snowair flow. Typical plots of these records are shown in Figure 1. Here is a graph of the density ρ snowair flow, calculated for given values of P and V by the formula $\rho(t) = \frac{2P(t)}{gV^2(t)}$, where g - acceleration of gravity.

Погрешность полученных результатов в среднем составляет 20-30%, хотя относительные ошибки регистрации мгновенных значений этих параметров в отдельные моменты времени могут быть значительно больше. Это наиболее вероятно для скоростей вследствие значительной инерционности датчиков скорости, а, следовательно, и для значений плотности. Из-за трудности учета инерционности датчиков скорости плотность рассчитывалась на основе совпадающих по времени значений V и P , при этом использовались все экстремумы графиков $V(t)$ и $P(t)$, а на монотонных участках этих графиков значения через интервалы времени в 2 сек.

Accuracy of the results by an average of 20-30%, although the relative sampling error of instantaneous values of these parameters at points in time can be significantly longer. This is most likely because of high rates of speed sensors inertia, and, consequently, for the density values. Because of the difficulty accounting inertia speed sensor density was calculated based on the shared values of the time- V and P , and the extremes of all used graphics $V(t)$ and $P(t)$, and the monotone areas of the value of these plots at intervals of 2 seconds.

Максимальные значения параметров снеговоздушного потока лавин.*

Maximum values snowair flow avalanches. *

number avalanc he	Date and time of the avalanche	Number and height of the mast of the sensors, m											
		4,5	7	13	2,5	4,5	7,5	11,5	15,5	2	6	16,5	20

1	4 December 1977, 9.00	$\frac{15}{150}$		$\frac{6}{50}$	$\frac{17}{94}$				$\frac{6}{-}$			$\frac{-}{22}$	
2	4 December 1977, 16:56	$\frac{19}{370}$		$\frac{20}{72}$	$\frac{20}{230}$				$\frac{10}{-}$	$\frac{-}{50}$		$\frac{-}{36}$	
3	19-20 February 1978 ночь	$\frac{10}{240}$	$\frac{10}{46}$										
4	21 February 1978, 8.00	$\frac{14}{80}$	$\frac{20}{64}$	$\frac{9}{3}$	$\frac{13}{-}$				$\frac{4}{-}$	$\frac{21}{-}$			
5	21 February 1978 11.30		$\frac{27}{-}$	$\frac{8}{32}$	$\frac{24}{-}$				$\frac{14}{-}$	$\frac{20}{-}$	$\frac{18}{-}$		
6	22 February 1978 17.20	$\frac{16}{-}$		$\frac{17}{60}$					$\frac{18}{-}$	$\frac{17}{-}$			
7	7 December 1978 21.00		$\frac{6}{-}$	$\frac{21}{100}$	$\frac{38}{-}$		$\frac{25}{230}$		$\frac{-}{40}$				
8	8-9 December 1978. night		$\frac{6}{-}$	$\frac{28}{-}$	$\frac{33}{-}$		$\frac{31}{-}$		$\frac{10}{-}$				$\frac{20}{-}$
9	2 January 1979, morning			$\frac{8}{-}$	$\frac{11}{-}$		$\frac{61}{-}$						
10	2 January 1979, 12.20			$\frac{11}{-}$	$\frac{10}{-}$		$\frac{91}{-}$						
11	3 January 1979, morning		$\frac{-}{250}$	$\frac{12}{-}$	$\frac{17}{56}$		$\frac{12}{-}$						$\frac{7}{-}$
12	3 January 1979, 22.00			$\frac{19}{-}$	$\frac{24}{-}$	$\frac{-}{70}$	$\frac{22}{68}$						$\frac{8}{-}$
13	31 January 1979, 16.00			$\frac{20}{180}$		$\frac{-}{40}$	$\frac{14}{34}$		$\frac{8}{-}$				$\frac{7}{-}$
14	28 January 1980 10.30			$\frac{16}{-}$	$\frac{38}{126}$	$\frac{26}{130}$	$\frac{20}{24}$	$\frac{-}{44}$	$\frac{11}{40}$				
15	28 January 1980, 10.30			$\frac{16}{-}$	$\frac{14}{32}$	$\frac{-}{32}$	$\frac{11}{12}$	$\frac{-}{20}$	$\frac{-}{6}$				
16	28 January 1980 10.40			$\frac{18}{-}$	$\frac{23}{64}$	$\frac{22}{94}$	$\frac{20}{30}$	$\frac{-}{44}$	$\frac{9}{28}$				
17	9 April 1980, 10.30			$\frac{23}{-}$	$\frac{40}{208}$	$\frac{32}{180}$	$\frac{38}{194}$	$\frac{-}{104}$	$\frac{15}{90}$				
18	9 April 1980 13.20			$\frac{17}{8}$	$\frac{18}{30}$	$\frac{10}{40}$	$\frac{12}{26}$	$\frac{-}{30}$	$\frac{3}{20}$				

* В числителе – скорости, м/с; в знаменателе – давление, кг/м²

* Numerator - speed, m / s in the denominator - the pressure, kg/m²

Распределение полученных записей скорости и давления показано в табл.1, где в числителе приведены максимальные значения скорости, а в знаменателе - давления снеговоздушного потока. Неполнота данных обусловлена недостаточным числом и частыми поломками датчиков, работающих в крайне тяжелых условиях.

The distribution of those recordings of velocity and pressure is shown in Table 1, where the numerator gives the maximum value of the velocity, and the denominator - the pressure snowair flow. Incompleteness due to the paucity of data and frequent breakdowns of sensors operating in very difficult circumstances.

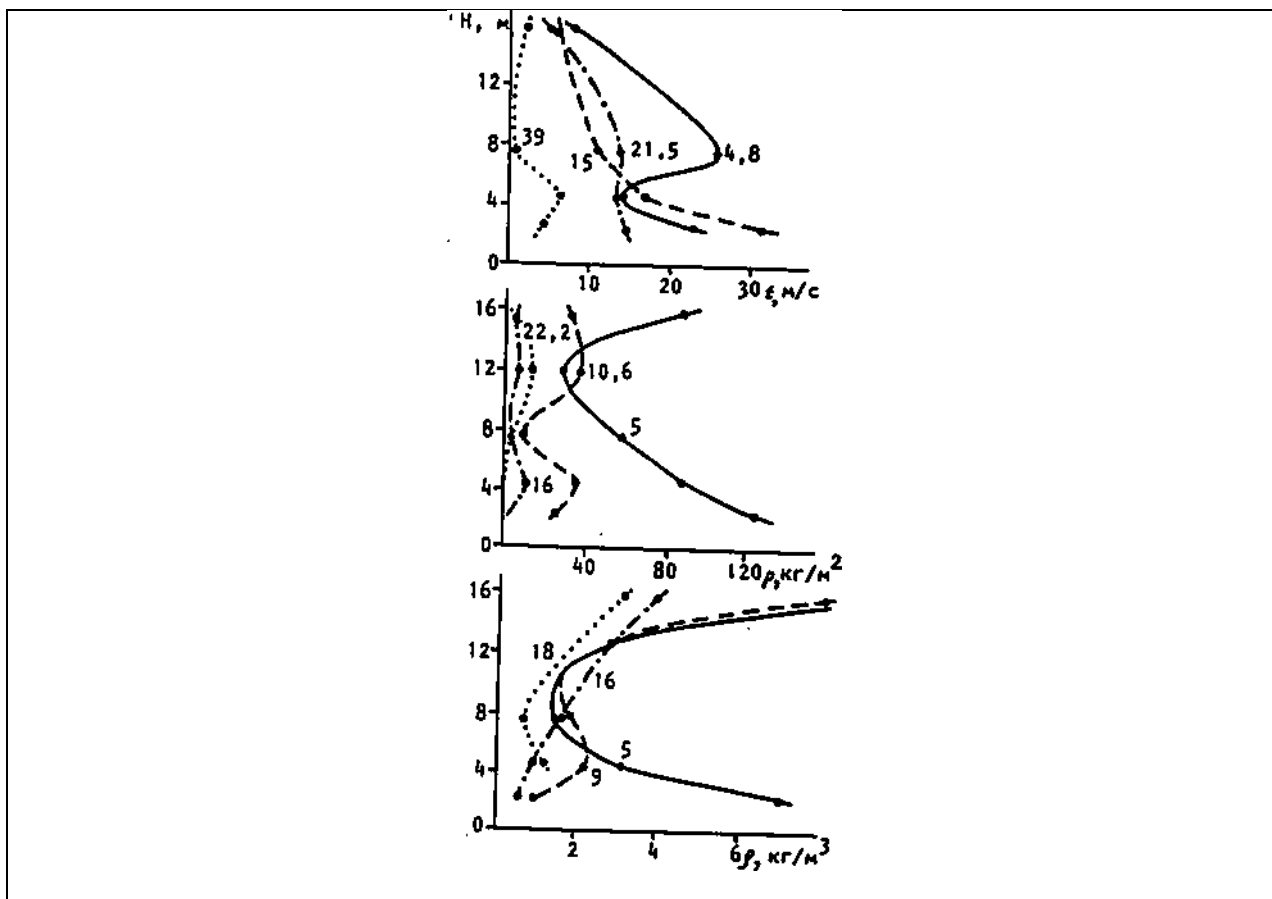


Рис.2. Высотные профили скорости V , давления P и плотности ρ снеговоздушного потока лавины в разные моменты времени t , с. Лавина 9 мая 1980 г., 10 час. 30 мин, вторая мачта.

Fig.2. Altitude profiles of the velocity V , the pressure P and density ρ snowair avalanche flow at different times t , s. Avalanche of May 9, 1980, 10:00. 30 minutes, the second mast.

Как видно из таблицы, в зимние сезоны 1977-1980 гг. отмечено семь лавиноопасных периодов длительностью до 4 суток, в течение которых комплексом зарегистрировано от 1 до 4 лавин. Метеорологическая обстановка в эти периоды, по данным метеостанции Терскол и метеоплощадки Эльбрусской станции МГУ, характеризовалась интенсивными осадками, повышением относительной влажности, температуры воздуха и почвы до значений, близких к 100% и 0°C. Все зарегистрированные лавины образованы из свежеснегов, что согласуется с многолетними наблюдениями Н.А.Урумбаева за лавинами Приэльбрусья, сопровождаемыми воздушной волной [3].

As the table shows, in the winter season 1977-1980. noted seven avalanche periods lasting up to four days, during which the complex is registered from 1 to 4 avalanches. Meteorological conditions during these periods, according to the weather station and meteorological Terskol Elbrus station MSU, characterized by heavy precipitation, higher relative humidity, air and soil temperatures to values close to 100% and 0 ° C. All registered avalanches are formed of fresh snow, which is consistent with long-term observations of avalanches N.A.Urumbaeva Elbrus, followed by air wave [3].

Исключение составляет лавиноопасный период в апреле 1980 г., который характеризовался значительными положительными температурами и интенсивными осадками в виде ливневого дождя до высот 2600-2700 м над уровнем моря. 9 апреля в 10 час. 30 мин. была зарегистрирована мощная воздушная волна от лавины, образованной из сухого свежеснегов в лавиносборе и мокрого снега, захваченного на участке от высоты 2600 м до места остановки лавины. В этот же день, в 13 час. 30 мин. была зарегистрирована еще одна воздушная волна небольшой мощности со средней скоростью и малыми давлениями, хотя и превышающими величину скоростного напора чистого воздуха.

The exception is the avalanche period in April 1980, which was characterized by significant positive temperatures and heavy precipitation in the form of a rain shower to altitudes 2600-2700 m above sea level. April 9 at 10:00. 30 minutes. was registered by a powerful air wave from the avalanche, formed of dry fresh snow and sleet avalanche catchment captured the area from a height of 2600 m to the point of stopping the avalanche. On the same

day, 13 hour. 30 minutes. was registered by another air wave of low power with high speed and low pressures, although it exceeds the value of the velocity head of clean air.

При обработке полученных записей параметров снеговоздушного потока использовались два подхода. Первый заключался в анализе совокупностей графиков $P(t)$, $V(t)$, $\rho(t)$ отдельных лавин с целью выявления закономерностей изменения этих параметров в пространстве. Для этого строились высотные (рис.2) и продольные профили мгновенных значений давления, скорости и плотности потока, а также вычислялась скорость распространения переднего фронта, т.е. фронта нулевых скоростей снеговоздушного потока всех лавин (табл. 2). Вычисление значений V_{pf} проводилось по формуле:

In processing the obtained records snowair flow parameters used two approaches. The first is to analyze sets of graphs $P(t)$, $V(t)$, $\rho(t)$ separate avalanches in order to identify patterns of change in these parameters in space. For this purpose, the high-altitude (Fig. 2) and longitudinal profiles of the instantaneous pressure, velocity and density of the flow, and calculate the propagation velocity of the leading edge, Front zero speeds snowair flow of avalanches (Table 2). Computing values V_{pf} conducted as follows:

$$V_{pf} = \frac{L_{ij}}{t_{0jn} - t_{0im}},$$

Где L_{ij} – расстояние между i – той и j – той мачтами, t_{0jn} , t_{0im} – время начала записей скорости и давления на n и m высотных уровнях. Строго говоря, продольные профили и значения V_{pf} следует строить и вычислять лишь для высотных уровней, лежащих на одних и тех же линиях тока. Однако положение этих линий неизвестно. Поэтому вычисленные значения: V_{pf} – это показатели не истинной, а кажущейся скорости распространения переднего фронта волны, которые могут равняться любой величине, в том числе бесконечной и отрицательной. Когда воздушная волна приходит на сравниваемые уровни разных мачт одновременно, то получается бесконечная величина, а если на уровень дальней мачты раньше, чем на сравниваемый с ним уровень ближней мачты, то отрицательная. Такие случаи возможны при сильных изменениях значений V, P, ρ, t_0 по высоте и свидетельствуют о сложной форме переднего фронта воздушной волны лавин.

Where L_{ij} - the distance between the i - and that j - of the masts, t_{0jn} , t_{0im} - the start time of velocity and pressure on n and m altitude levels. Strictly speaking, the longitudinal profiles and values V_{pf} should build and calculate only for high levels of which lie on the same streamlines. However, the position of these lines is unknown. Therefore, the calculated values V_{pf} - this performance is not true and the apparent velocity of the leading edge of the wave, which can be any value, including infinite and negative. When the air wave comes at different levels compared masts simultaneously, we obtain an infinite value, and if the level of long-mast before to compare with it the level near the mast, then the negative. Such cases are possible when strong changes of values V, P, ρ, t_0 height and show a complex form the leading edge of an air wave avalanches.

Положение переднего фронта в вертикальной плоскости может быть найдено двумя способами: 1/ построением вертикальных профилей значений t_0 на нескольких мачтах и соединением плавной кривой высотных уровней с одинаковыми значениями t_0 ; 2/ интегрированием начальных участков графиков $V(t)$, полученных на разных высотных уровнях одной мачты, и построением графика $H_K(S_K)$, где $S_K = \int_{t_{0k}}^{t_{0max}} V_k(t)dt$, K – номер высотного уровня $K = 1, 2, \dots, t_{0max}$ – максимальное значение величин t_0 на данной мачте. Второй способ является приближенным, так как предполагает незначительность изменений скоростей потока на расстояниях S_K , но требует гораздо меньшего числа точек регистрации, чем первый. Как показали расчеты, проведенные вторым способом для некоторых лавин, форма переднего фронта снеговоздушного потока в вертикальной плоскости близка к острому клину с углом около 10° при вершине, расположенной на самых нижних уровнях.

Position of the leading edge in the vertical plane can be found in two ways: 1 / building vertical profiles of values t_0 several masts and connecting the smooth curve of high-rise levels with the same values of t_0 ; 2 / integration of the initial section of the chart $V(t)$, obtained at different levels of a high-rise mast and plotting $H_K(S_K)$, where $S_K = \int_{t_{0k}}^{t_{0max}} V_k(t)dt$, K - number of high-rise level $K = 1, 2, \dots, t_{0max}$ - The maximum value of t_0 on this mast. The second way is approximate, as it implies minor changes of flow rates at distances of S_K , but requires a much smaller number of registration points, than the first. As the calculations carried out by the second method for some avalanches, form the leading edge snowair flow in a vertical plane close to the edge of the wedge with an angle of about 10° at the top, located at the lowest levels.

Кажущаяся скорость переднего фронта снеговоздушного потока лавин V_{pf} , м/с*

The apparent velocity of the leading edge of the flow of avalanches snowair V_{pf} , m / s *

От первой до второй мачты				От второй до третьей мачты				От первой до третьей мачты				
Но- мер ла- ви- ны	от точки на высо- те, м	до точки на высо- те, м	$V_{эф}$	Но- мер ла- ви- ны	от точки на высо- те, м	до точки на высо- те, м	$V_{эф}$	Но- мер ла- ви- ны	от точки на высо- те, м	до точки на высо- те, м	$V_{эф}$	
1	4,5	2,5	23/23	2	2,5	2	-/11,5	2	4,5	2	-/15,4	
2			19,5/20,5	1		16,5	-/7,4	4			35/-	
4			10/-	2			-/10,8	1		16,5	-/11,2	
1		15,5	4,3/-	8			41/-	2			-/15	
2	7,0		7,7/-	11		20	22/-	4	7,0	2	46/-	
4		2,5	11,4/-	12			9,6/-	8		20	46/-	
8			50/-	8			250/-	2		2	-/16,2	
8		7,5	29/-	12		20	10,9/-	5		6	∞	
8		15,5	18,5/-	13	15,5		27/-	1	13,0	16,5	-/11,8	
1		2,5	29/25	5		6	-25/-	2		16,5	-/15,8	
2			23/23	8		20	-41/-	12				
9			14,5/-	13			23/-				11,3/-	
10	13		5,7/-									
12			13/-									
9		7,5	9/-									
10			5,2/-									
12			11,5/-									
2		15,5	14,5/-									
5			35/-									

* В числителе – по графикам скорости, в знаменателе – по графиками давления.

* In the numerator - the graphs of speed, in the denominator - on schedule pressure.

Полученные в каждой точке регистрации записи $V(t)$, $P(t)$ при таком вероятностно-статистическом подходе рассматривались как реализации некоторого нестационарного случайного процесса, развивающегося во времени и пространстве и имеющего общие для всех зарегистрированных лавин черты. Цель такого подхода - найти эти черты и пределы разброса параметров снеговоздушного потока, которые, возможно, окажутся характерными для всех лавинных очагов, подобных данному, и помогут составить представление о реально действующем механизме образования воздушной волны лавин.

Obtained at each point of registration records $V(t)$, $P(t)$ in such a probabilistic and statistical approach is seen as the realization of a non-stationary random process that develops over time and space and has common features of all reported avalanche. The purpose of this approach - to find these features and limits of variation of parameters snowair flow which may prove characteristic of all avalanche centers such as this and help get an idea of any mechanism education airwave avalanches.

С этой целью на первом этапе обработки полученной информации мы использовали самые простые статистические методы: 1/ проводили осреднение по совокупностям графиков $V(t)$, $P(t)$, полученных в данной точке регистрации в течение одного сезона и за все время наблюдений по формулам типа:

To this end, in the first stage of processing the information we used the most simple statistical methods: 1 / performed averaging aggregates graphs $V(t)$, $P(t)$, obtained at the point of registration in a single season and all-time observations of formulas such :

$$\bar{V}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i(t),$$

где N - число таких графиков; 2/ определяли среднеквадратическое отклонение параметров снеговоздушного потока по данным совокупностям графиков

where N - the number of such plots, 2 / standard deviation of the measured parameters snowair flow chart according to aggregates

$$\sigma(t) = \sqrt{\frac{\sum [V_i(t) - \bar{V}(t)]^2}{N - 1}};$$

3/ подбирали функции, аппроксимирующие осредненные кривые; 4/ анализировали распределения характерных параметров графиков $P(t)$, $V(t)$: максимальных значений скорости и давления P_{max} , V_{max} (см.табл.1), длительности и крутизны переднего фронта графиков $V(t)$, $P(t)$:

3 / picking function approximating the averaged curves, 4 / analyzed the distribution of characteristic parameters of the graphs $P(t)$, $V(t)$: the maximum values of the velocity and pressure P_{max} , V_{max} (see Table 1), the length and steepness of the leading edge of the graph $V(t)$, $P(t)$:

$$\tau_{pf} = t_{max} - t_0, \quad S_{fp} = \frac{A_{max}}{\tau_{fp}},$$

Где t_{max} – время регистрации максимального значения A_{max} этих графиков. Для значений V_{max} , P_{max} определяли также средние и наибольшие величины для всех точек регистрации и строили высотные и продольные их профили.

Where t_{max} - the registration maximum A_{max} of these graphs. For values of V_{max} , P_{max} defined as the average and the highest value for all points of registration and build high-rise and longitudinal their profiles.

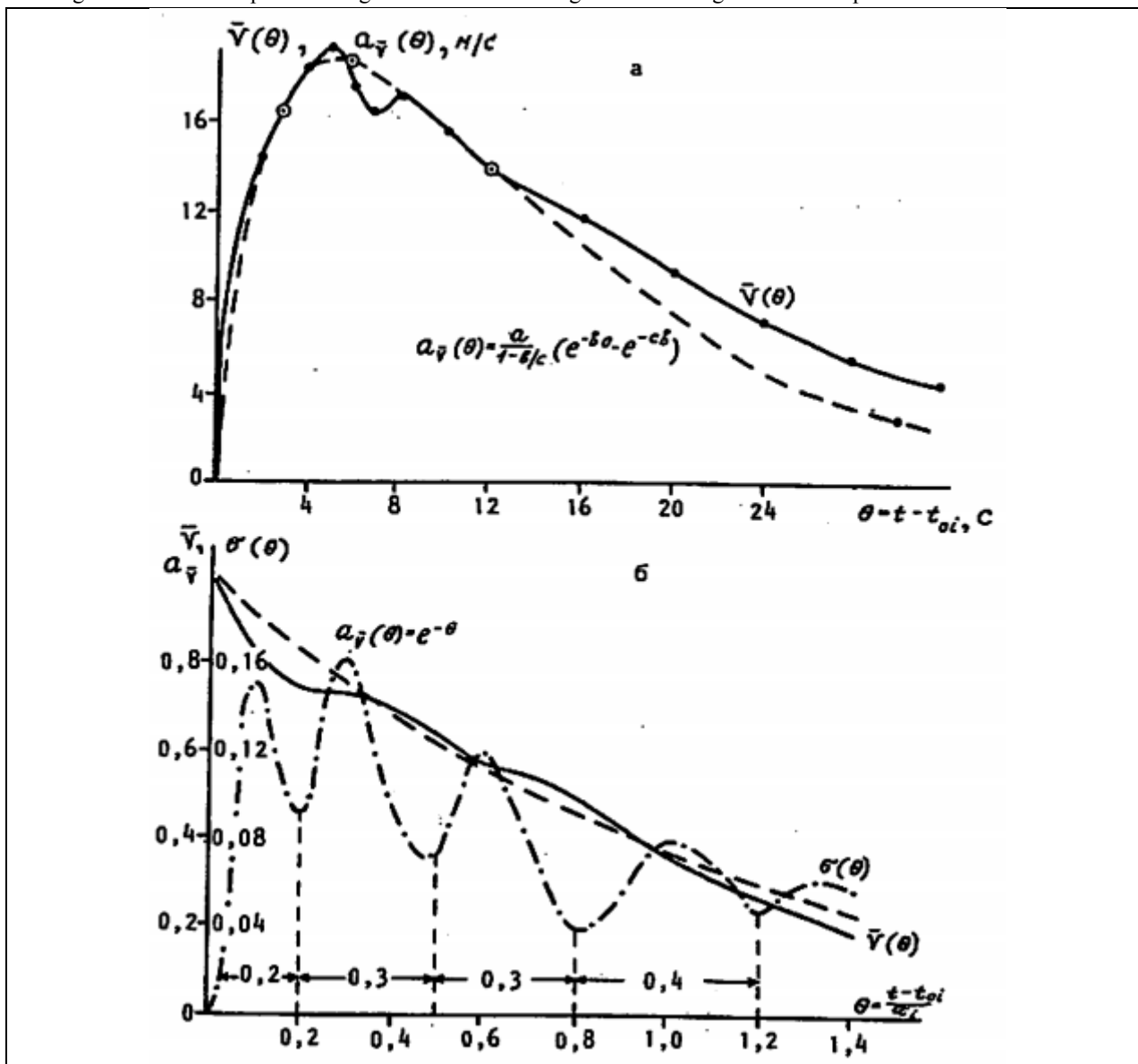


Рис.3. Аппроксимация графиков осредненной скорости снеговоздушного потока лавин $\bar{V}(\theta)$: а - на всем протяжении разностью двух экспонент, σ - спада $\bar{V}(\theta)$ одной экспонентой. Осреднение проведено по совокупности записей $V(t)$ лавин 1978-1979 гг., вторая мачта, высота 2,5 м

Fig.3. Approximation of the average velocity graphs snowair flow avalanches $\bar{V}(\theta)$: а - all over the difference between two exponential functions, σ - recession $\bar{V}(\theta)$ by a single exponential. Averaging conducted jointly records $V(t)$ Avalanche 1978-1979., The second tower, the height of 2.5 m

На рис.3 приведены для одной из точек регистрации осредненные графики скорости и аппроксимирующие их функции, построенные двумя способами. В первом случае осреднение проводилось только со смещением каждого графика $V_i(t)$ на время t_{oi} , а аппроксимация полученной осредненной кривой осуществлялась на всем ее протяжении функцией, представляющей собой разность двух экспонент. Способ определения параметров такой аппроксимирующей функции по $\bar{V}(t)$ был предложен инженером В.А.Грибовым. К сожалению, при этом учитываются значения $\bar{V}(t)$ лишь в трех точках, отстоящих от

начала координат на кратные временные интервалы, что не позволяет определить оптимальные значения этих параметров.

On fig.3 given for one of the registration points averaged speed graphs and approximating their functions constructed in two ways. In the first case, the averaging was carried out only with the displacement of each graph $V_i(t)$ at the time t_{0i} , and the approximation of the curve obtained by averaging performed in its entirety function representing the difference between two exponential functions. The method for determining the parameters of such approximating functions $\bar{V}(t)$ has been proposed as an engineer V.A.Gribovym. Unfortunately, this takes into account the values of $\bar{V}(t)$, only three points separated from the origin to multiple time periods, which is not to determine the optimum values of these parameters.

Во втором случае осуществлялась аппроксимация простой экспонентой лишь спада графика $\bar{V}(t)$, на возможности которого указывал и Ю.Л.Якимов (личное сообщение). Аппроксимацию легко выполнить с наименьшей среднеквадратичной ошибкой, определив постоянную затухания через угол наклона прямой регрессии, проведенной через любое количество точек графика $\ln \bar{V}(t)$. Оказалось, что ошибку такой аппроксимации можно уменьшить, если предположить экспоненциальный характер спада каждого из суммируемых графиков $V_i(t)$. Для этого необходимо для каждого из них определить указанным способом постоянную затухания T_i экспоненты, пронормировать их одновременно по уровню и по времени по своим значениям $V_{\max i}$ и T_i , сместив предварительно все графики $V(t)$ на время $t_{\max i}$ и уже после этого проводить осреднение. При этом среднеквадратическая ошибка аппроксимации построенной таким образом кривой $\bar{V}(\theta)$ экспонентой $e^{-\theta}$ (θ - нормированное по T_i время: $\theta = \frac{t}{T_i}$) составляет 0,04. График среднеквадратического разброса $\sigma^2(\theta)$ значений $V_i(\theta)$ при таком осреднении имеет ярко выраженный колебательный характер с периодом, близким к одной трети постоянной затухания экспоненты (см.рис.3б).

In the second case, a simple exponential approximation was carried out only fall schedule $\bar{V}(t)$, which pointed to the possibility and Yu.L.Yakimov (personal communication). Approximation is easy to perform with the least mean square error by determining the decay constant through the angle of the regression line drawn through any number of points of the graph $\ln \bar{V}(t)$. It was found that an error of this approximation can be reduced, assuming exponential decay of each of the graphs summed $V_i(t)$. To do this, for each of them to determine in this way the exponential decay constant T_i , normalize them both in terms of time and its values $V_{\max i}$ and T_i , displacing previously all schedules $V(t)$ at time $t_{\max i}$ and after that perform averaging. In this case, the mean square error of approximation thus constructed curve $\bar{V}(\theta)$ the exponential $e^{-\theta}$ (θ - normalized to T_i time: $\theta = \frac{t}{T_i}$) is 0.04. Rms scatter graph $\sigma^2(\theta)$ values $V_i(\theta)$ in this averaging a pronounced oscillatory character with a period close to one-third of the exponential decay constant (see. fig.3b).

При анализе характерных параметров графиков $V(t)$ и $P(t)$ нужно учитывать следующие обстоятельства (рис.4). Наибольшее значение давления 375 кг/м^2 зарегистрировано за все время наблюдений на первой мачте, а скорости - около 50 м/с - на второй мачте на минимальной высоте. При этом на первой мачте высотные профили средних и наибольших из максимальных значений давления имели ярко выраженную вогнутую форму, близкую к обратной зависимости, а профили таких же значений скорости - выпуклую, с максимумом на высотах порядка 10 м .

In the analysis of the characteristic parameters of graphs $V(t)$ and $P(t)$, consider the following conditions (Fig. 4). The highest value of pressure 375 kg/m^2 registered on record in the first tower, and speed - about 50 m/s - the second tower at the lowest position. At the first mast height profiles of the largest medium and maximum pressure had a pronounced concave shape similar to an inverse relationship, and profiles of the same values of speed - convex, with a maximum at about 10 m .

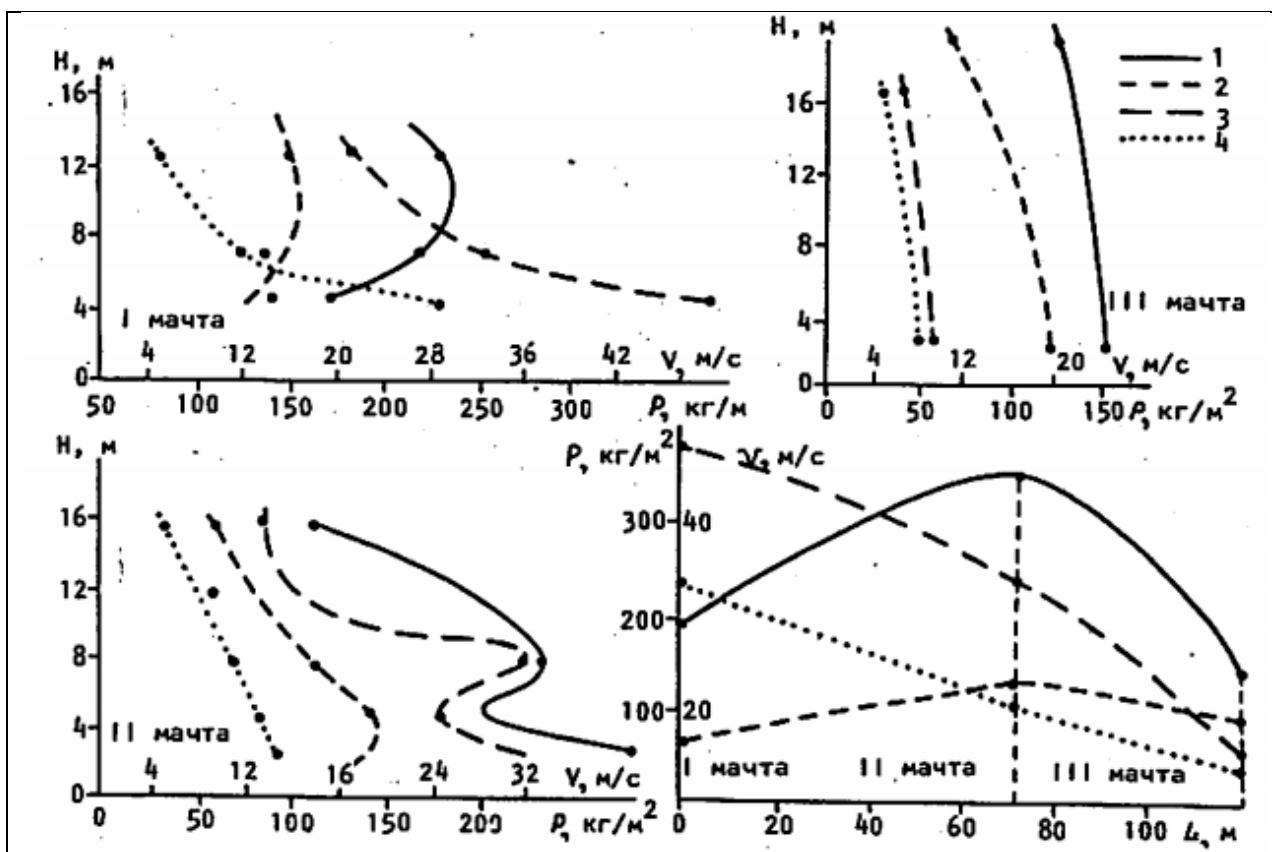


Рис.4. Высотные и продольный профили наибольших и средних из максимальных значений скорости $\max(V_{\max})$ (1) и $\bar{V}_{\max}$ (2) и давления $\max(P_{\max})$ (3) и $P_{\max}$ (4) снеговоздушного потока

Fig.4. Tall and longitudinal profiles of the maximum and average maximum speed $\max(V_{\max})$ (1) and $\bar{V}_{\max}$ (2) and pressure $\max(P_{\max})$ (3) and $P_{\max}$ (4) flow snowair

На второй мачте высотные профили наибольших из максимальных значений скорости и давления имели зигзагообразную форму с максимумами на высотах 2,5 и 7,5 м, а высотные профили средних из максимальных близки к прямым линиям с максимумом внизу. На третьей мачте все профили близки к почти вертикальным прямым линиям. В продольном направлении наибольшие и средние из максимальных значений давления уменьшаются почти линейно с увеличением расстояния от линии остановки лавинного снега, а такие же значения скорости неожиданно имеют явный максимум у второй мачты. В целом в исследуемой зоне наиболее вероятные максимальные значения давления составляют порядка 100 кг/м^2 , а скорости - $10\text{-}20 \text{ м/с}$.

On the second mast height profiles of the largest maximum velocity and pressure have a zigzag shape with a maximum at 2.5 and 7.5 m, and height profiles of the Medium as close to straight lines, with a maximum at the bottom. In the third mast, all profiles are close to the almost vertical straight lines. In the longitudinal direction, and the highest average of the maximum pressure decreases almost linearly with increasing distance from the stop line avalanche of snow, and the same speeds suddenly have a clear peak in the second tower. In general, the study area of the most probable maximum pressure of the order of 100 kg/m^2 , and speed - $10\text{-}20 \text{ m/s}$.

Время нарастания интенсивности снеговоздушного потока, т.е. длительность переднего фронта $\tau_{\text{пф}}$ графиков $V(t)$, $P(t)$ в большинстве случаев составляет 5-7 и 1-3 с, соответственно. Минимальное значение этой величины 1 с для скорости и 0,4 с для давления было зарегистрировано на самых нижних уровнях первой и второй мачт. При этом максимальная крутизна переднего фронта графиков скорости оказалась равной 12 м/с^2 , а графиков давления - $240 \text{ кг/м}^2\text{с}$. Наиболее же часты значения этих величин порядка 5 м/с^2 и $50 \text{ кг/м}^2\text{с}$, соответственно.

The rise time of the intensity snowair flow, length of the leading edge τ_{pf} graphs $V(t)$, $P(t)$ in most cases is 5-7 and 1-3 s, respectively. The minimum value of this quantity is 1 for speed and 0.4 seconds for the pressure were recorded at the lowest levels one and two masts. The maximum slope of the leading edge of the chart speed was found to be 12 m/s^2 , a pressure chart - $240 \text{ kg/m}^2\text{s}$. However, the most frequent value of the order of 5 m/s^2 and $50 \text{ kg/m}^2\text{s}$, respectively.

Максимальная длительность процесса прохождения снеговоздушного потока, судя по графикам давления, около 25 с. а по графикам скорости - 60 с; при аппроксимации спада графиков $V(t)$ экспонентой эту длительность можно считать равной трем постоянным времени затухания экспоненты. Значения этих постоянных равно 13-22 с для всех графиков $V(t)$, для которых подбирались аппроксимирующие экспоненты.

The maximum duration of the passage snowair flow, according to the charts of pressure, about 25 seconds. and for speed - 60 seconds in the approximation of the recession graph $V(t)$ the exponential this duration can be considered equal to three exponential decay time constant. The values of these constants are 13-22 with all graphs $V(t)$, which were selected for approximating the exponential function.

Характерная особенность большинства графиков давления, в отличие от графиков скорости, заключается в наличии двух резко отличающихся участков. Первый участок больших давлений по форме близок к треугольнику и имеет длительность несколько секунд. Второй, более длительный - это участок многократных кратковременных всплесков давления небольших, до 50 кг/м^2 , величин.

A characteristic feature of most schedules pressure, in contrast to the rate schedules, is to have two very different areas. The first portion of high pressure is similar in form to the triangle and has a duration of several seconds. The second, longer - it is a part of multiple short bursts of small pressure, up to 50 kg/m^2 , values.

Расчетная плотность снеговоздушного потока лавин максимальна в самые первые мгновения регистрации давления. Однако получающиеся при этом цифры $20\text{-}30 \text{ кг/м}^3$ следует считать завышенными: при расчетах плотности по совпадающим во времени и нарастающим значениям давления и скорости в расчетную формулу из-за инерционности датчиков скорости подставляется меньшее значение скорости, чем действительно имеющее место в данный момент. После прохождения максимума давлений плотность пульсирует, убывая в среднем в пределах $1\text{-}7 \text{ кг/м}^3$. Неожиданностью оказался меньший размах этих пульсаций на малых высотах ($1\text{-}4 \text{ кг/м}^3$), чем на высоте 15,5 м ($1,5\text{-}7 \text{ кг/м}^3$).

Calculated density snowair maximum flow avalanches in the very first moments of pressure recording. However, the figures obtained in this $20\text{-}30 \text{ kg/m}^3$ should be considered too high: in the calculation of the density of the coincident in time and increasing values of pressure and velocity in the calculation formula because of the inertia of the speed sensors use a lower speed than is actually taking place at the moment. After passing the maximum density pulsating pressures, decreasing on average within 7.1 kg/m^3 . The surprise was a smaller scale of these fluctuations at low altitudes ($1\text{-}4 \text{ kg/m}^3$) than at the height of 15.5 m ($1.5\text{-}7 \text{ kg/m}^3$).

Отмеченные особенности изменения параметров снеговоздушного потока лавин во времени и пространстве требуют соответствующего объяснения при реконструкциях пространственной структуры воздушной волны и механизма ее возникновения.

Noted features of parameters snowair flow avalanches in time and space require an appropriate explanation for reconstructions of the spatial structure of the air waves and the mechanism of its occurrence.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорян С.С., Урумбаев Н.А. О природе лавинной воздушной волны. -Научн.тр.Ин-та механики МГУ, № 42. М., 1975, с.74-82.
2. Урумбаев Н.А. Определение давления, скорости и плотности лавинной воздушной волны. Вести.Московск.ун-та, география, 1974, № 3, с.65-72.
3. Урумбаев Н.А. Исследование воздушных волн снежных лавин (на примере Приэльбрусья). Автореф.дисс. на соиск.учен.степ.канд.геогр.наук. МГУ. М., 1973, 24 с.
4. Урумбаев Н.А., Струков Б.Б. Экспериментальный комплекс для телеметрического изучения параметров движущейся лавины. - Тр.ВГИ, вып.49, 1980, с.21-29.

REFERENCES

1. SS Grigoryan, Urumbayev NA On the nature of flooding the air waves. -Nauchn.tr.In of Mechanics of Moscow State University, № 42. Moscow, 1975, p.74-82.
2. Urumbayev NA The pressure, velocity and density of the avalanche air waves. Vesti.Moskovsk.un Press, Geography, 1974, № 3, p.65-72.
3. Urumbayev NA Study of the air waves of avalanches (for example Elbrus). PhD Thesis. on соиск.учен.степ.канд.геогр.наук. MSU. Moscow, 1973, 24 p.
4. Urumbayev NA, BB Strukov Experimental setup for telemetry study of the parameters of the moving avalanche. - Tr.VGI, vyp.49, 1980, p.21-29.