

## Исследование систем сланцеватости на леднике Джанкуат

В.Н. Голубев, А.В. Орлов, А.В. Иоспа, Д.А. Фролов

Московский университет

Статья поступила в редакцию 5 января 1999 г.  
Представлена членом редколлегии Ю.Я. Мачеретом

Рассмотрены соотношения между направлением линий тока ледника, элементами залегания и глубиной формирования систем сланцеватости.

Язык ледника Джанкуат спускается в северо-западном направлении в долину р. Адыл-су, образуя в области абляции два уступа с изменением наклона поверхности от 4 — 5 до 15 — 20° [3]. Язык формируется тремя основными потоками, которые сходятся в верхней части области абляции, а генерализованные направления линий тока изменяются от западного, северо-западного и северного в верхней части до северо-западного в нижней (рис. 1).

Крупные открытые трещины в средней части языка ледника располагаются веерообразно, оконтуривая поднятие ложа. Повсеместно на поверхности ледника и бортах открытых трещин проявляется сланцеватость льда, формируемая системами тонких трещин отдельности или скола, имеющих обычно четкие прямолинейные очертания. Встречаются как залеченные или плотно притертые трещины, так и раскрытые на отдельных участках на несколько миллиметров или сантиметров. Изучение роли хрупких нарушений (в частности, сланцеватости льда) в механизме течения

ледника было одной из основных задач экспедиционных работ, проведенных здесь в 1997, 1998 и 1999 гг.

На любом участке поверхности ледника, как правило, можно обнаружить несколько систем сланцеватости, различающихся элементами залегания и степенью переработки ледяного материала. Трещины одной системы сланцеватости располагаются почти параллельно друг другу, ограничивая блоки льда шириной от нескольких сантиметров до нескольких метров. Практически во всех случаях можно зафиксировать смещение ледяных блоков вдоль плоскостей сланцеватости, сопровождаемое разрушением кристаллов и смещением их частей с амплитудой до нескольких сантиметров (рис. 2).

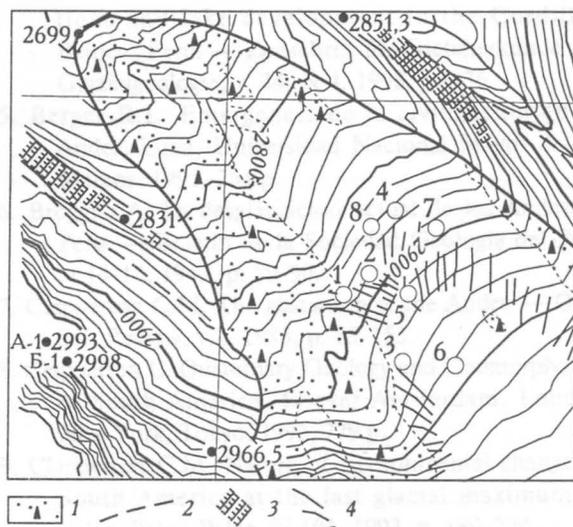


Рис. 1. Схема расположения точек наблюдения (1 — 8) на языке ледника Джанкуат: 1 — моренный чехол, 2 — тропа, 3 — эрозионные ложбины на внутреннем склоне боковой морены, 4 — трещины

Fig. 1. Scheme of the observation points (1 — 8) on the tongue of the Djankuat glacier: 1 — debris cover, 2 — trail, 3 — gullies on inner slope of lateral moraine, 4 — crevasses

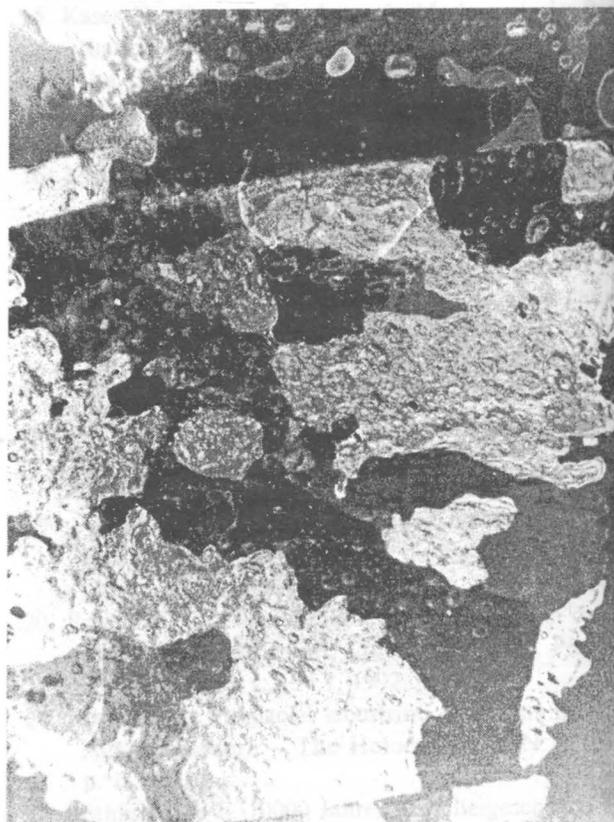


Рис. 2. Фотография среза льда, параллельного поверхности ледника. Отчетливо прослеживается смещение кристаллов вдоль плоскостей сланцеватости

Fig. 2. Polarized microphotograph of an ice thin section, taken parallel to the surface of the glacier. The crystals shift along the foliation planes is clearly seen

Падение трещин обычно крутое (30 — 80°), в глубину ледника.

Во всех точках наблюдений (см. рис. 1) оказалось возможным выделить систему сланцеватости, у которой направление падения плоскостей отдельности почти противоположно направлению линии тока на этом участке ледника (табл. 1). Так, в точке 1 имеется две основные системы сланцеватости: пологопадающая с углами наклона 25 — 30° и азимутом падения 90° В и круто падающая с углами наклона 40 — 58° и азимутом падения 50 — 60° СВ. Линии тока в этой части ледника направлены на запад, а наклон поверхности составляет в среднем 12°. В точке 2 выделяются три системы сланцеватости: пологая с углами падения 25 — 35° в направлении 80 — 90° ЮВ и две круто падающих с углами падения 45 — 50° и 35 — 49° в направлении 125° и 140 — 160° ЮВ. Линии тока здесь ориентированы в направлении 300° СЗ, а наклон поверхности ледника достигает 20°. В точке 3, расположенной на 50 м выше, в районе слияния двух потоков ледника, также можно выделить три системы сланцеватости: относительно пологую с углами падения 35 — 43° в направлении 120° ЮВ, круто падающую с углами наклона 57 — 65° в направлении 90 — 100° В и наиболее круто падающую с углами наклона 68 — 76° и азимутом падения около 130° ЮВ. Линии тока в этом месте ледника также направлены на запад, а наклон поверхности составляет в среднем 14°. В точках 4 и 5 линии тока имеют направления 310 и 290° СЗ при наклоне поверхности 20 — 21°, а основные системы сланцеватости имеют углы падения 15 — 35° и 40 — 55°.

Наблюдения за смещениями блоков льда были проведены в области абляции в диапазоне абсолютных высот 2750 — 2950 м на нескольких стационарных площадках на поверхности ледника и на стенках

открытых трещин, субпараллельных линиям тока. Методика исследований заключалась в фиксации расположения реперов, установленных с обеих сторон каждой плоскости сланцеватости. Для этого в бортах трещин в горизонтально забуренные отверстия глубиной 20 — 30 см и диаметром 1 см вставляли плотно подогнанные деревянные реперы на расстоянии (в зависимости от расположения текстурных неоднородностей) от 3 см до 1 м. Изменения во взаимном расположении реперов, произошедшие между повторными наблюдениями (обычно одни сутки), оценивали по изменениям общей длины профиля, расстояний между соседними реперами и углов между ними относительно горизонтальной плоскости. Погрешность возникала главным образом из-за подтаивания устья забуренных отверстий, но не превышала 1,5 см при измерениях расстояний и 2° при измерениях угла между реперами (в сентябре 1997 г. температура воздуха у поверхности ледника в зоне исследований составляла от -2 до 1°С, в августе 1998 г. от 0 до 4°С). После повторных замеров при необходимости отверстия добуривали и вновь измеряли взаимное расположение реперов.

Всего было оборудовано девять профилей длиной от 4,5 до 9 м в пяти трещинах и установлено 108 реперов на 54 погонных метра. За время наблюдений зафиксировано пять относительно перемещений соседних блоков льда, значительно превышающих возможную погрешность измерений (табл.1). Изменения угла наклона между соседними реперами на стенках трещин также в несколько раз превышали возможную погрешность.

Наибольшие смещения были зафиксированы в точке 1 (на 10 и 19 см) вдоль обеих систем сланцеватости (30 — 45° и 45 — 58°) и в точке 3 (на 10 см) вдоль системы сланцеватости с углом падения 57 — 65° и

Таблица 1  
Смещения по основным системам сланцеватости на языке ледника Джанкуат

Номера точек наблюдений	Азимут линии тока	Наклон поверхности, град	Системы сланцеватости		Смещения	
			азимуты падения, град.	углы падения, град.	количество	расстояние, см
1	290 З	12	90 В	25-40	1	10
			50-60 СВ	42-58	2	19
			80-90 В	25-35	0	0
2	300 СЗ	20	125 ЮВ	45-50	0	0
			140-160 ЮВ	35-42	0	0
			120 ЮВ	35-43	0	0
3	270 З	14	90-100 В	57-65	1	10
			130 ЮВ	68-73	0	0
4	310 З	20	130-150 ЮВ	50-55	1	9
			160-170 ЮВ	30-35	0	0
5	290 З	21	140 ЮВ	15-20	0	0
			190 ЮЗ	40-45	1	6
6	300 СЗ	9	180 Ю	60-70	0	0
7	340 СЗ	16	195-205 ЮЗ	56-64	0	0
8	300 СЗ	22	150 ЮВ	48-52	1	8

азимутом падения  $100^\circ$ . В точках 4, 5 и 8 суммарные смещения за время наблюдений не превышали 10 см, в остальных точках они либо не выходили за пределы возможной погрешности измерений, либо вообще не были обнаружены.

Зафиксированные смещения, как правило, приурочены к системам сланцеватости, азимут падения которых практически противоположен азимуту линии тока (отклонения обычно не превышают  $30^\circ$ ). В точке 5 старая залеченная поверхность сланцеватости (угол падения  $15 - 20^\circ$ ) смещена на 6 см относительно более молодой, но также залеченной поверхностью сдвига, угол падения которой составляет  $45^\circ$ , а азимут падения ( $190^\circ$  ЮЗ) отклоняется на  $80^\circ$  от направления, противоположного современной линии тока. Это смещение, по-видимому, соответствует тем хрупким нарушениям, которые формировались на этапах движения масс льда в расположенной выше зоне, где направление линий тока соответствовало  $340 - 10^\circ$ , а отклонение азимута падения поверхностей сланцеватости от направления, противоположного линии тока, составляло лишь  $20 - 30^\circ$ .

Смещения происходили обычно скачкообразно, в пределах одних суток. Лишь смещение на 19 см в точке 1 произошло в два приема: сначала на 10 см и через двое суток еще на 9 см. Подобные смещения блоков льда служат основным элементом эстафетного механизма движения, предполагающего последовательные надвиги вышележащих блоков на нижележащие вдоль поверхностей хрупких нарушений [1, 2]. Такие поверхности могут располагаться как в пределах текстурно-структурных неоднородностей ледника с пониженными прочностными свойствами, так и иметь какое-либо иное направление при условии, что суммарное усилие при сдвиге в этом направлении будет минимальным. На рис. 3 показано возможное расположение поверхностей сдвиговых смещений (C-C) относительно поверхности ложа или

текстурно-структурной неоднородности (O-O). Сдвиг блока льда по C-C может иметь место при условии:

$$L_o \delta_o > 2L_c \delta_c,$$

где  $L_o$  и  $L_c$  — протяженность поверхностей сдвига вдоль ложа или текстурно-структурной неоднородности и вдоль C-C, соответственно,  $\delta_o$  и  $\delta_c$  — предельные сопротивления сдвигу в этих направлениях. Протяженность поверхностей сдвига вдоль O-O и вдоль C-C составляет:

$$L_o = H_i / [\cos\beta + (\sin\beta) / \text{tg}(\alpha - \beta)] / \text{tg}\alpha \text{ и}$$

$$L_c = H_i (\cos\alpha) / \sin(\varphi + \alpha),$$

где  $H_i$  — толщина ледника в данной точке,  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\varphi$  — углы наклона поверхности ледника, поверхности ложа или текстурно-структурной неоднородности и поверхности сдвига, соответственно. При условии квазипостоянства  $\delta_c$  суммарное усилие сдвига по C-C уменьшается по мере возрастания  $\varphi$  и становится минимальным при  $(\varphi + \alpha) = 90^\circ$ . Соотношение между наклоном поверхности ледника  $\alpha$ , наклоном поверхности сдвига  $\varphi$  и наклоном ложа или текстурно-структурной неоднородности  $\beta$  можно охарактеризовать выражением:

$$\sin(\varphi + \alpha) > 2(\delta_c / \delta_o) \cdot (\sin\alpha) / [\cos\beta + (\sin\beta) / \text{tg}(\alpha - \beta)]. \quad (1)$$

Согласно (1), минимальные значения угла  $\varphi$  снижаются при уменьшении наклона поверхности  $\alpha$  и увеличении наклона ложа  $\beta$ . Выражение в квадратных скобках характеризует влияние наклона ложа или текстурной неоднородности на наклон поверхностей сланцеватости: при  $(\beta/\alpha) < 0,55$  угол  $\varphi$  принимает отрицательные значения, т.е. азимут падения плоскостей сланцеватости может совпадать с азимутом наклона поверхности и ложа ледника, а угол па-

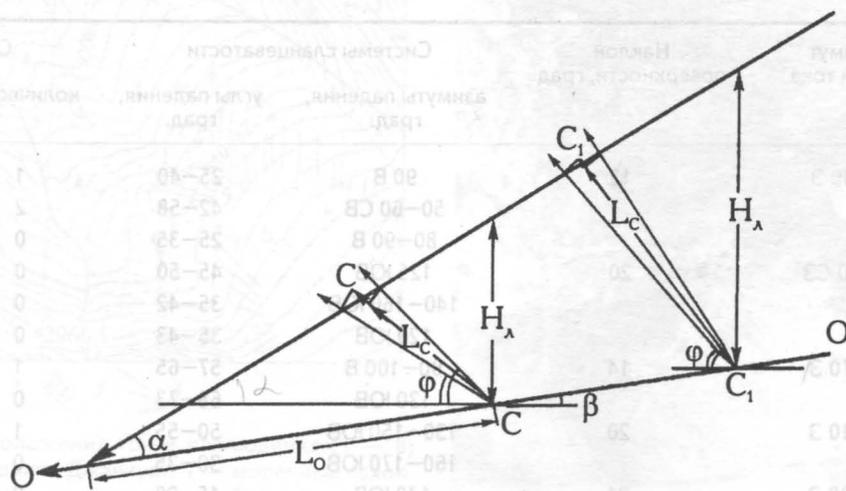


Рис. 3. Расположение поверхностей сдвиговых смещений (C-C, C<sub>1</sub>-C<sub>1</sub>) относительно ложа ледника или текстурной неоднородности (O-O),  $\alpha$ ,  $\beta$  — углы наклона поверхности и ложа ледника,  $\varphi$  — угол наклона сланцеватости. Остальные обозначения и пояснения в тексте

Fig. 3. Positions of shifting (C-C, C<sub>1</sub>-C<sub>1</sub>) relative to the glacier bed or textural non uniformity (O-O),  $\alpha$  and  $\beta$  are the angles of the glacier surface and the bed, respectively,  $\varphi$  is the foliation angle. See text for further explanations

дения занимает промежуточное положение между углами наклона ложа и поверхности.

Принимая соотношение между предельным сопротивлением сдвигу по массиву льда и сопротивлением сдвигу по текстурно-структурным неоднородностям, равным  $(\delta_c/\delta_o) = k$ , и полагая  $k = 1,2$  [2], можно охарактеризовать диапазон возможных значений  $\varphi$  в зависимости от наклона поверхности ледника  $\alpha$ :

Наклон поверхности ледника $\alpha$	5°	10°	15°	20°	25°
Наклон поверхностей сдвига $\varphi$	1-85°	2-80°	3-75°	4-70°	5-65°

Минимальные значения  $\varphi$  здесь определяются уравнением (1) при  $\beta = 0,7\alpha$ , а максимальные, исходя из того, что  $\sin(\varphi + \alpha) \leq 1$ .

На рис. 4 показаны границы возможных значений  $\varphi$  и приведены реально наблюдаемые соотношения между наклоном основных систем сланцеватости и поверхности ледника  $\alpha$ . Результаты наблюдений находятся в пределах выделенных границ, причем направление падения поверхностей сланцеватости, вдоль которых смещения происходили в период наблюдений, практически противоположно направлению линии тока, а наклон таких поверхностей тяготеет к области максимальных значений  $\varphi$ .

Возникновение внутри- и межкристаллических микротрещин, дающих начало поверхностям сланцеватости и смещения, возможно лишь при определенном соотношении размеров кристаллов и энергии упругой деформации [2]:

$$H^* = B/(D)^{0,5},$$

где  $H^*$  — глубина ледника, на которой становится возможным формирование микротрещин,  $B = 5,5 \cdot 10^3 \text{ см}^{1,5}$  — коэффициент пропорциональности,  $D$  — средний размер зерен в ледяном горизон-

те, см. В области абляции ледника Джанкуат средний размер зерен составляет 2,5 см [3] и соответственно  $H^* \approx 35$  м, т.е. начиная с этой глубины в ледяных зернах возникают системы микротрещин, при объединении которых могут формироваться поверхности сланцеватости и смещения.

При учете работы трения и работы против сил гравитации средняя толщина льда  $H_{cp}$ , при которой ледяные блоки могут смещаться по образовавшимся поверхностям сланцеватости, определяется выражением [2]:

$$\sin \varphi \geq \text{tg} \alpha \left( \frac{4\tau^*}{\rho g H_{cp} \cos^2 \beta} - 0,9 \right), \quad (2)$$

где  $\alpha, \beta$  и  $\varphi$  — соответственно углы наклона поверхности ледника, поверхности ложа и поверхности сдвига,  $\tau^* = 0,1 - 0,15$  Мпа — предельное сопротивление сдвигу при температуре 273 К,  $\rho g H_{cp}$  — среднее значение массовых сил, действующих на площади поверхности сдвига. Согласно (2), при наклоне поверхности ледника  $\alpha = 15^\circ$  и наклоне поверхности ложа или текстурно-структурной неоднородности  $\beta = 0,7\alpha$  наклон поверхностей сланцеватости  $\varphi$  уменьшается от  $75^\circ$  при толщине ледника 35 м до  $40^\circ$  при толщине 50 м и до  $7^\circ$  при толщине 120 м. На еще большей глубине направление падения поверхностей сдвигов может изменяться до совпадающего с направлением наклона поверхности и ложа ледника и, в частности, совпадать с годовыми слоями, поскольку в общем случае сопротивление сдвигу вдоль текстурной неоднородности меньше, чем в массиве льда. Вследствие постепенного изменения крутизны наклона плоскостей сланцеватости форма интегральной поверхности смещения, протягивающейся от ложа до поверхности ледника и объединяющей поверхности сланцеватости, формирующиеся на локальных участках разреза, приближается к гиперболической, асимптотами которой служат поверхности годовых слоев и плоскость, перпендикулярная поверхности ледника.

В области абляции наряду с вновь сформировавшимися системами сланцеватости на поверхность ледника проецируются и системы сланцеватости, которые зародились в придонных частях годовых слоев, когда они находились на больших глубинах. Для этих систем характерно более пологое падение, а также залеченные поверхности сланцеватости (например, точка 5, где на глубине 4 м зафиксировано смещение старой залеченной поверхности сланцеватости с  $\varphi = 15^\circ$  более молодой, но также залеченной поверхностью с  $\varphi = 45^\circ$ ). Поэтому по мере приближения к концу ледника среди систем сланцеватости все чаще фиксируются пологие и относительно залеченные, а расположение активных поверхностей сдвига определяется не только наклоном поверхности ледника, но и возможностью смещения блоков льда по ранее сформировавшимся системам.

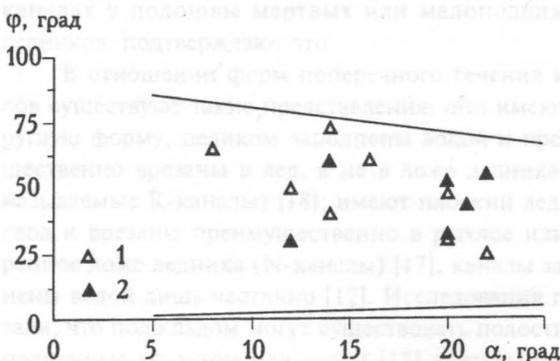


Рис. 4. Диапазон возможных значений наклона поверхностей сланцеватости  $\varphi$  в зависимости от наклона поверхности ледника  $\alpha$ : 1 — основные системы сланцеватости в исследованной части ледника, 2 — системы сланцеватости, вдоль которых смещения происходили в период наблюдений

Fig. 4. The range of possible values of the foliation inclination  $\varphi$  vs. glacier surface angle  $\alpha$ . 1 — the main foliation systems in the studied parts of the glacier. 2 — the foliation systems where shifting observed during the investigation

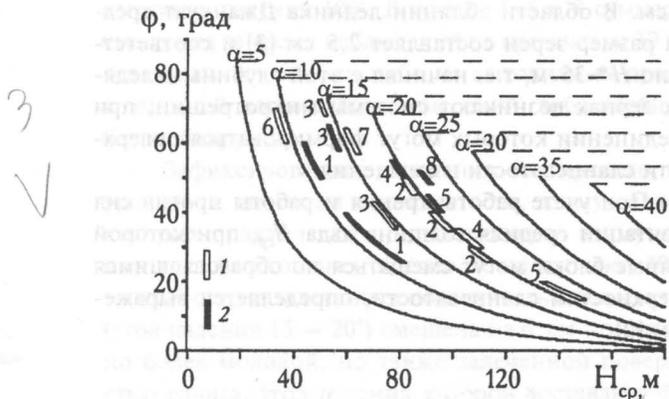


Рис. 5. Зависимость наклона поверхностей сланцеватости  $\varphi$  от толщины вышележащего слоя льда  $H_{cp}$  и угла наклона поверхности ледника  $\alpha$ : 1 — системы сланцеватости в исследованной части ледника Джанкуат, 2 — системы сланцеватости, вдоль которых смещения произошли в период наблюдений

Fig. 5. The dependence of the dip angles of the foliation systems  $\varphi$  on thickness of the overlying ice  $H_{cp}$  and angle of a glacier surface  $\alpha$ . 1 — the foliation systems in the studied parts of the Djankuat glacier, 2 — the foliation systems where shifting observed during the investigation

На рис. 5 показаны возможные диапазоны наклона поверхностей сланцеватости  $\varphi$  в зависимости от толщины вышележащего слоя льда  $H_{cp}$  и наклона поверхности ледника  $\alpha$  при наклоне ложа или текстурной неоднородности  $\beta = 0,7\alpha$  и с учетом зависимости максимальных значений  $\varphi$  от  $\alpha$ . Там же приведены значения  $\varphi$  для систем сланцеватости из табл. 1. Системы сланцеватости, вдоль которых смещения происходили в период наблюдений, могли зарождаться при толщине вышележащего слоя льда не менее 50 — 90 м, что, согласно [3], соответствует толщине ледника на этих участках. Зарождение наиболее пологих систем

сланцеватости (точки 2 и 5) могло происходить на глубинах не менее 120 — 150 м, что согласуется с определениями мощности ледника на расположенных выше и более крутых участках.

Полученные результаты показывают, что показатели залегания сланцеватости позволяют судить не только о направлении линий тока ледника, но и о возможной глубине формирования данной системы сланцеватости.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект N96-05-65446 и 99-05-79048к).

ЛИТЕРАТУРА

1. Голубев В. Н. Соотношение колебаний горных ледников с климатическими событиями. — МГИ, вып. 82, 1997, с. 3-12.
2. Голубев В. Н. Современные колебания купола Вавилова на Северной Земле. — МГИ, вып. 85, 1998, с. 196-204.
3. Ледник Джанкуат. Л., ГИМИЗ, 1978, 184 с.

SUMMARY

The study of foliation on the Djankuat glacier showed that several foliation systems with different dip were present in ablation area. Shifting of neighboring blocks of ice relative to each other during the investigation was noted along the foliation planes, and the dip of the foliation systems was, as a rule, opposite to the direction of the ice flow. The shifting had "jerky" character and achieved several centimeters per day. The paper presents analytical relationships between angles of a glacier surface, angles of the shifting surfaces and depth of a shifting surface formation. The estimation of the depth of formation of the foliation systems corresponds to the data on the Djankuat glacier thickness.

3  
Возможны

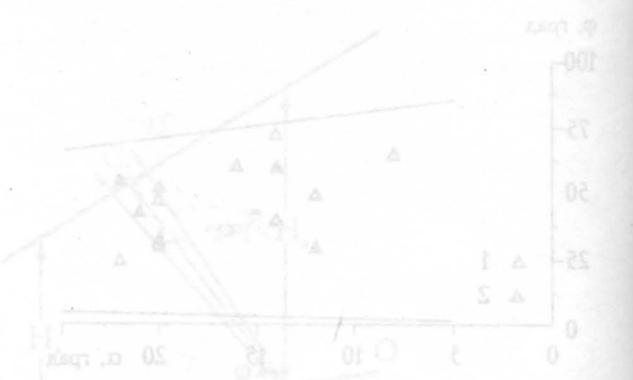


Рис. 4. Диапазон возможных значений наклона поверхностей сланцеватости  $\varphi$  в зависимости от наклона  $\alpha$ : 1 — основные системы сланцеватости в исследованной части ледника, 2 — системы сланцеватости, вдоль которых смещения произошли в период наблюдений