

УДК 551.324.6:551.583 (235.221)

**РОЛЬ МОНИТОРИНГА ГОРНЫХ ЛЕДНИКОВЫХ СИСТЕМ В  
ОЦЕНКЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО И ПРИРОДНО-РЕСУРСНОГО  
ПОТЕНЦИАЛА КАЗАХСТАНА**

Доктор геогр. наук П.А. Черкасов

*По новой методике определения объема ледников, с учетом их морфологии, установлено, что в Джунгарском Алатау находится около 42 км<sup>3</sup> льда. Приводятся основные положения теории и методики расчета составляющих и баланса внешнего массообмена ледников с учетом их физической поверхности. Дается описание их пространственной изменчивости и устойчивости существования в пределах Джунгарской ледниковой системы в зависимости от строения рельефа гор и особенностей циркуляции атмосферы. В среднем основная масса ледников в этой горной стране исчезнет через 100 лет при условии сохранения тенденций изменения климата.*

Экология предгорных, наиболее освоенных, территорий Восточного и Юго-Восточного Казахстана, расположенных в условиях аридного климата, находится в полной зависимости от наличия пресной воды. Одним из источников такой воды являются ледники, залегающие в горных системах Алтая, Джунгарского Алатау и Тянь-Шаня. В условиях крупных экологических нарушений природных процессов (Аральское море, оз. Балхаш) катастрофически нарастает дефицит пресной воды. Он обостряется ещё и потому, что с 20-х годов нашего века наблюдается систематическое уменьшение площади и объема горных ледников, что связано с долго-периодными 256- и 79-летними ритмами изменения климата, а также наложившейся на них антропогенной деятельностью, которая ведёт к общепланетарному повышению температуры воздуха из-за увеличения концентрации парниковых газов. Их эмиссия неуклонно усиливается по мере роста промышленности, транспорта и энергетики.

Учитывая эти обстоятельства, гляциологи Института географии Министерства-Академии наук РК в течение 40 лет ведут обширные натурные наблюдения за режимом экспериментальных горных ледников. Наиболее изученными из них являются ледники Тулюксу в Заилийском Алатау и Шумского - в Джунгарском Алатау. Данные ежегодных наблюдений, полученные на них, передаются в

Мировую службу мониторинга ледников (Швейцария, Цюрих) для публикации и оценки состояния оледенения всей планеты.

На материалах этих исследований разрабатывается мониторинг ледниковых систем в горах Казахстана путём определения прямых и обратных связей комплекса характеристик энергомассообмена ледников как в пространстве, так и во времени. На основе данных определения толщины более 100 ледников Джунгарского Алатау методами сейсмического, наземного и воздушного радиолокационного зондирования создан более точный метод расчета запасов льда в горных ледниковых системах Казахстана с учётом морфологических типов ледников [1, 2, 3]. Впервые численно доказано, что фигура поперечного сечения ложа горных ледников Казахстана близка к полуэллипсу. Предложена новая формула определения объёма горных ледников ( $q$ )

$$q = \pi / 4 \sum_{i=1}^n S_i h_i ,$$

где  $S_i$  - площади отдельных частей ледника, ограниченных горизонталями с заданным сечением рельефа (высотных зон);  $h_i$  - толщина ледника на профиле зондирования в пределах выше названных высотных зон.

Связь объёмов ледников  $q$  с их площадью  $S$  аппроксимирована степенными функциями вида

$$q = a S^b ,$$

где  $a$  и  $b$  - числовые коэффициенты.

Все обследованные ледники делятся на три группы морфологических типов по величине объёма льда на единицу их площади. Ледники основных долин, объёмы и площади которых связаны следующей зависимостью:

$$q = 29,76 S^{1,379} .$$

Для ледников висячих долин и каров объём льда находится по формуле

$$q = 49,369 S^{1,202} ,$$

где  $S$  измерена в  $\text{км}^2$ , а  $q$  в  $\text{км}^3$ .

Объём льда ледников висячего типа на склонах определялся, согласно [6, 7], по формуле

$$q = 0.393 \cdot 10^{-8} S^{1,124} ,$$

где  $S$  в  $\text{м}^2$ , а  $q$  в  $\text{км}^3$ .

По разработанной методике подсчитан объем льда в каждом речном бассейне и суммарно для всей Джунгарской ледниковой системы. В целом он примерно равен  $42 \text{ км}^3$ , а масса льда, таким образом, равна  $37,8 \cdot 10^9 \text{ т} \pm 2,04 \cdot 10^9$ . Это составляет больше половины всего объема оледенения территории Казахстана.

В основу разработки теории, методов изучения и моделирования процессов внешнего массообмена ледников положены факты, альтернативы которым нет. Назовём основные из них. В горах ледники лежат на склонах разной ориентации и крутизны в виде разрозненных масс льда различного размера. Основную роль в энергетическом балансе ледников играет солнечная радиация, роль тепла воздуха является вторичной. Сочетание различных факторов создаёт резкую контрастность микроклиматических условий существования ледников, что отражается на их типах, размерах и формах (рис. 1).

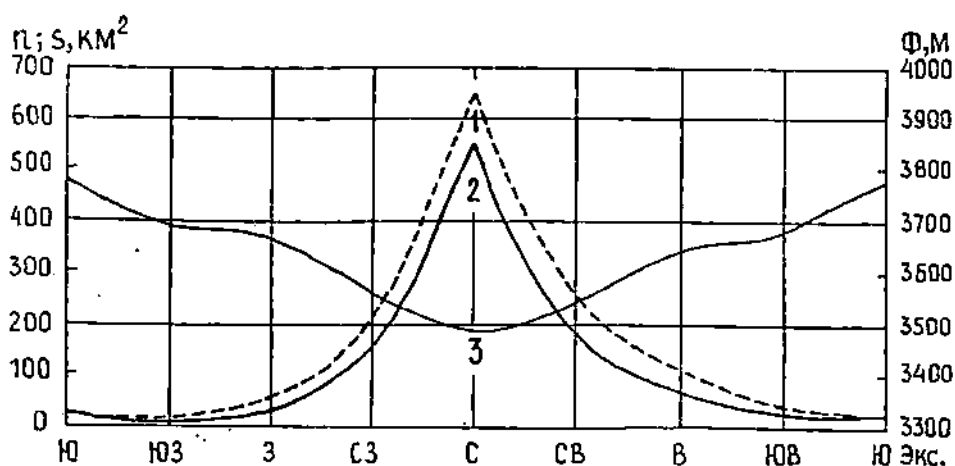


Рис. 1. Распределение количества  $n$  (1), площади  $S$  (2) и абсолютной высоты фирновой линии  $\Phi$  (3) в зависимости от экспозиции (Экс.) ледников Джунгарского Алатау

С учётом названных факторов нами разработаны и внедрены в практику научных исследований методы расчёта аккумуляции осадков и абляции снега и льда на физической поверхности ледников. Их основой стали разработки методов расчёта: температуры воздуха на любом леднике горной страны; температурного коэффициента таяния снега и льда на физической поверхности ледников; склоновых коэффициентов инсоляции для различных групп типов ледников, с учётом условий их закрытости, экспозиции и времени года.

Расчёт температурного коэффициента таяния снега и льда  $T_{КС(л)}$  за каждый день абляционного периода  $d$  на физической поверхности ледников произведен с учётом восьми переменных: географической широты места  $\varphi$ , типа ледника  $N$ , абсолютной высоты любой точки на леднике  $Z$ , её ориентации  $\alpha$ , угла наклона  $\beta$ , альбедо  $A_K$ , общей облачности  $\theta$  и склонового коэффициента инсоляции  $C_K$ . Он выполнен для 4-х характерных участков ледника: 1 - снег на тыловой стене цирка ледника выше её подножья  $Z_p$ ,  $A_K = 80-90\%$ ; 2 - снег выше снеговой линии, но ниже  $Z_{п}$ ,  $A_K = 50-70\%$ ; 3 - лёд с летним снегом ниже снеговой линии,  $A_K = 30-40\%$ ; 4 - лёд ниже снеговой линии,  $A_K = 15-20\%$ .

В общем виде формула имеет вид

$$T_{КС(л)d(\varphi, N, Z, \alpha, \beta, A_K, \theta)} = \{ [T_{КС(л)}(A_K, \theta)_{1-4}] + 0,01e^{1,56Z} \} \times \\ \times \frac{C_{kd(\varphi, N, \alpha, \beta)ЭП}}{C_{kd(\varphi, N, \alpha, \beta)ЭКСП}}$$

Здесь  $T_{КС(л)}(A_K, \theta)_{1-4}$  - температурный коэффициент таяния снега или льда на экспериментальной (эксп) площадке у конца языка ледника в зависимости от одного из 4-х вышеназванных условий альбедо её поверхности  $A_K$  и хода общей облачности  $\theta$ ;  $C_{kd(\varphi, N, \alpha, \beta)ЭКСП}$  - склоновый коэффициент инсоляции для условий экспериментальной площадки ледника за данный день года;  $C_{kd(\varphi, N, \alpha, \beta)ЭП}$  - склоновый коэффициент инсоляции для условий элементарной площадки (эп) на леднике за этот же день года. Подробнее методика приведена в работе [4]. На основе этих исследований разработаны модели расчёта и алгоритмы, образующие систему численного моделирования. Они позволяют за любой балансый год воспроизводить полную картину формирования всех составляющих водно-ледового баланса на физической поверхности каждого ледника в пределах бассейнов рек какой-либо ледниковой системы. К ним относится годовой снегозапас на снеговой линии  $C_{Тсл}$ , а для площади всего ледника определяют максимальный снегозапас (или зимний баланс)  $C_w = b_w$ , летние осадки  $C_S$ , годовой снегозапас  $C_T$ , возможную летнюю абляцию  $A_S$ , внутреннее питание  $F$ , воду от таяния, поступившую в сток  $A_S - F$ , летний баланс  $b_S$ , чистую аккумуляцию  $b_{лФ}$ , чистую абляцию  $b_{пл}$  и баланс ледника  $b_n$ . Кроме того, рассчитывают ледниковую составляющую в стоке всех рек системы; скорость оборота массы льда в бассейнах рек ледниковой системы; скорость изменения (в настоящее время преимущественно уменьшения) массы льда каждого ледника и в целом для бассейнов рек горной страны.

Разработаны методы прогноза составляющих внешнего массообмена на ближайший балансовый год и более продолжительный период. Эта система численного моделирования пока не имеет аналогов.

Краткую оценку мониторинга ледников дадим на примере ледника Шумского, а их пространственного режима - на примере ледниковой системы Джунгарского Алатау. Ледники представляют собой продукт климата, поэтому их характерной особенностью является нестационарность, выражающаяся в изменении формы и размеров. Из общей суммы осадков, выпадающих на ледники за балансовый год, в среднем 59 % приходится на зиму, которая там продолжается 9 месяцев. За 3 месяца лета (период абляции) выпадает 41 % осадков, т.е. в 1,4 раза меньше, но их интенсивность в 1,85 раза выше, чем осадков зимнего периода. Количество осадков зимнего периода от года к году меняется мало ( $\pm 0,14$  м нормы), а летнего периода (часто выпадающих в виде снега) - в широком диапазоне ( $\pm 0,47$  м нормы). Чем больше летних осадков, тем меньше тает лёд, и наоборот. В связи с этим, характер летних осадков, как правило, оказывается определяющим фактором режима баланса массы ледников.

Результаты расчёта фазового состава летних осадков в ледниковой зоне Джунгарского Алатау за 1966/67 - 1990/91 гг. наблюдений [5] указывают на присутствие тренда увеличения смешанных осадков, а с повышением температуры воздуха будет расти и доля жидкой фазы. За 25 лет наблюдений удельная скорость аккумуляции составляла в среднем 1,03 м/год, а скорость абляции, поступившей в сток, равнялась минус 1,14 м/год, отсюда сальдо поверхностного баланса массы было отрицательным, минус 0,11 м/год. В зависимости от интенсивности летних снегопадов находилась и высота снеговой линии.

За период наблюдений выделены близкие к 5- и 11-летним ритмы режима ледника Шумского, последние приходятся на 1971/72, 1980/81 и 1988/89 балансовые годы, но в то же время чётко прослеживается, с одной стороны, тренд систематического уменьшения летних осадков, а с другой - тренды увеличения интенсивности абляции снега и льда, доли ледникового стока, высоты снеговой линии и отрицательного сальдо баланса. За этот период ледник сократился в длину на 238 м и потерял площадь 0,0641 км<sup>2</sup>, равную 2,23 % площади ледника в 1966 г. Причём ледник Шумского является одним из наиболее "жизнеспособных" в Джунгарском Алатау (рис. 2).

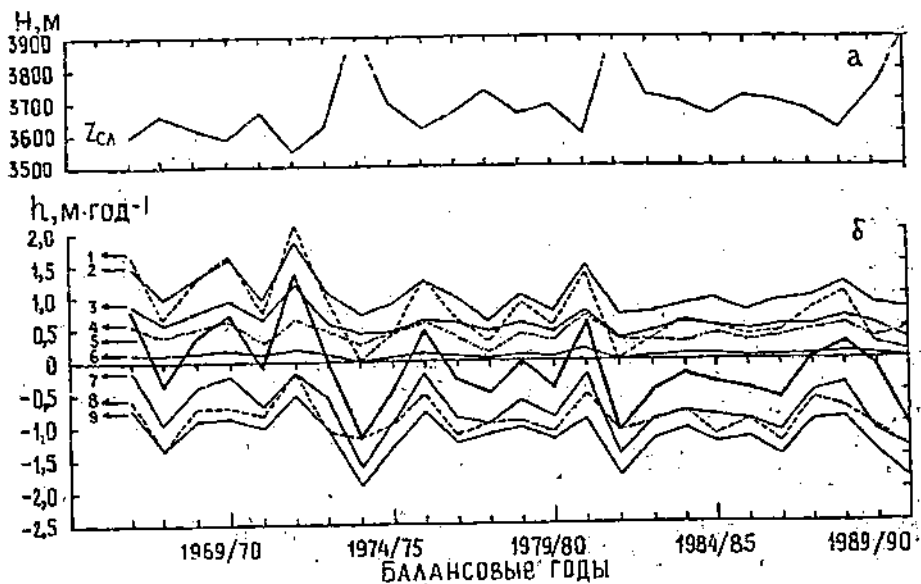


Рис. 2. Характеристики режима ледника Шумского за 1966/67 - 1990/91 балансовые годы: а - высота снеговой линии  $Z_{сл}$ ; б - составляющие внешнего массообмена для определения баланса ледника, где 1 - чистая аккумуляция  $b_{нГ}$ ; 2 - годовая аккумуляция  $C_T$ ; 3 - максимальный снегозапас (чистый баланс)  $b_w$ ; 4 - летняя аккумуляция  $C_S$ ; 5 - чистый годовой баланс  $b_n$ ; 6 - внутреннее питание  $F$ ; 7 - летний баланс  $b_S$ ; 8 - чистая абляция; 9 - годовая абляция  $A_T$ .

Для примера оценки пространственной изменчивости состояния оледенения Джунгарской ледниковой системы был выбран 1976/77 балансовый год, средний по режиму за весь период наблюдений (рис. 3). Изменчивость условий существования ледников Джунгарского Алатау на территории Казахстана показана на трех макросклонах: южном, западном и северном. В связи с различиями поступления на эти склоны солнечной радиации и выпадения осадков под влиянием специфических особенностей циркуляции атмосферы (на западной стороне гор за год выпадает 1,5 м осадков, а на восточной - всего 0,7 м) на них формируется своеобразный режим внешнего массообмена ледников. Наиболее активно процессы внешнего массообмена ледников совершаются в бассейнах рек западного склона горной системы (бассейн р. Каратал): здесь больше всего выпадает осадков (1,181 м), больше всего они вместе со льдом тают (1,665 м) и у них формируется самый неблагоприятный баланс (минус 0,483 м) по сравнению с другими макросклонами горной страны.

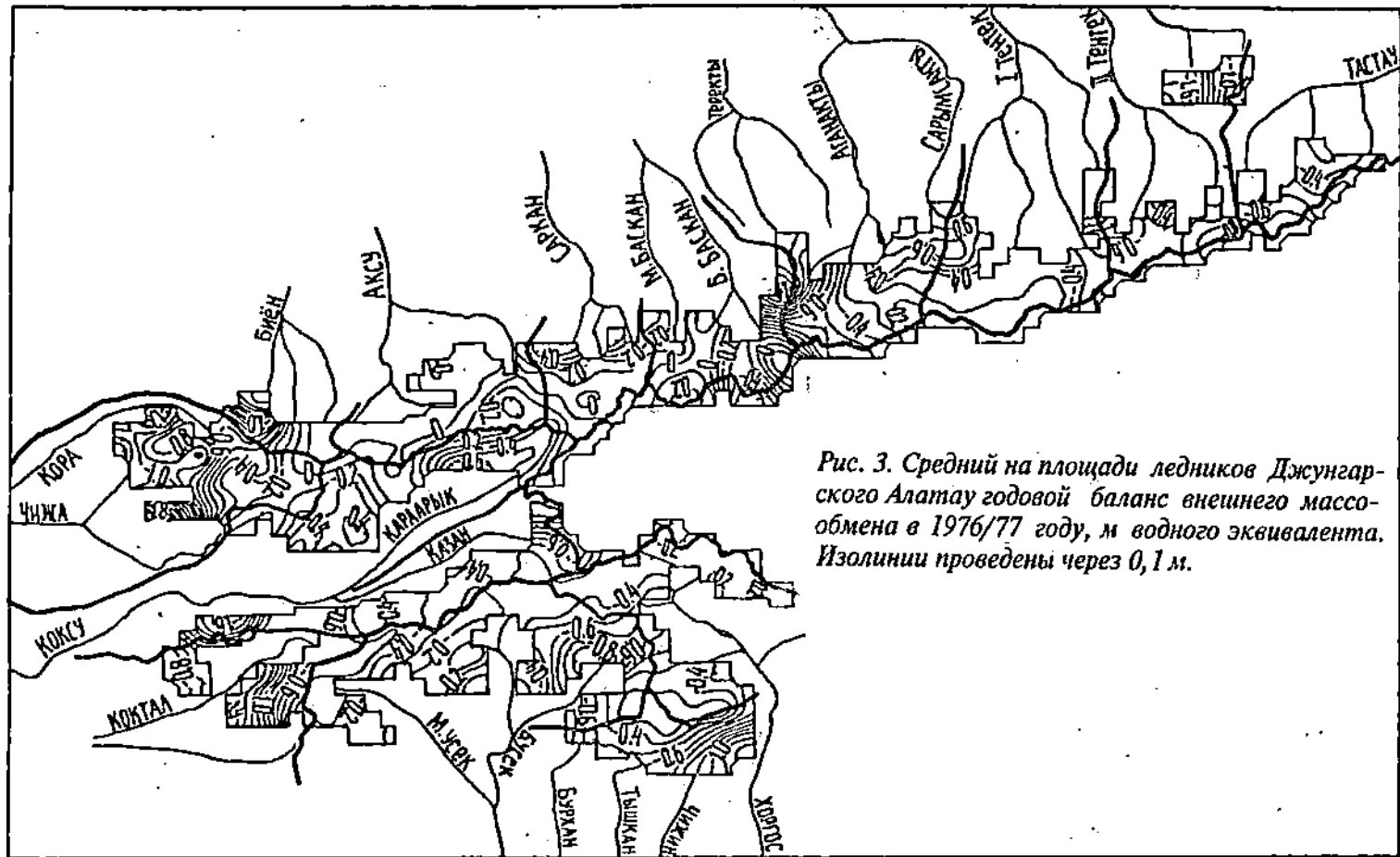


Рис. 3. Средний на площади ледников Джунгарского Алатау годовой баланс внешнего массообмена в 1976/77 году, в водного эквивалента. Изолинии проведены через 0,1 м.

В бассейнах рек северной ориентации стока (Биён - Ыргайты) ледники получают за балансовый год меньше осадков (0,930 м), чем в бассейнах рек южного склона гор (Хоргос - Усек) 1,002 м, но они меньше тают (соответственно, 1,092 м и 1,433 м) и в 2,3 раза больше получают внутреннего питания (соответственно, 0,106 м и 0,046 м). Отсюда и баланс ледников на северном склоне гор более благоприятен для их существования (минус 0,375 м), чем на южном (минус 0,430 м).

Абсолютная высота снеговой линии растёт с севера на юг (в среднем от 3490 до 3780 м) и с запада на восток (от 3200 до 3700 м). Во всех случаях она увеличивается по направлению от периферии внутрь гор. Тем не менее, лучшими условиями баланса массы обладают ледники, расположенные внутри гор, чем на периферии. Они получают меньше осадков, но и меньше тают за счёт большой высоты залегания и большого альбедо поверхности, т.е. они больше получают внутреннего питания. Самый большой модуль стока с ледников наблюдается в бассейнах рек западного склона гор (0,00215 км<sup>3</sup>/км<sup>2</sup>). Реки южного склона дают ледникового стока больше (0,00177 км<sup>3</sup>/км<sup>2</sup>), чем северного склона (0,00161 км<sup>3</sup>/км<sup>2</sup>). Минимальная его величина формируется в районе максимального поднятия гор на территории бассейна реки Баскан (там, где находится ледник Шумского) и составляет всего 0,00144 км<sup>3</sup>/км<sup>2</sup>. Со всей ледниковой системы Джунгарского Алатау в этот балансовый год в 17 рек поступило 1,4 км<sup>3</sup> воды. На нижнем уровне зоны формирования стока доля ледниковых вод составила 38,1 %.

Оценка устойчивости существования ледниковой системы даётся путём определения изменения массы льда ледников (преимущественно потери) за балансовый год (G) и времени их полного уничтожения K<sub>Г</sub>

$$G = q_{1970} / b_{\text{СР}} ,$$

$$K_{\text{Г}} = 1970 + G ,$$

где G - время исчезновения ледников, в годах; K<sub>Г</sub> - номер календарного года исчезновения ледников; q<sub>1970</sub> - масса льда на 1970 г. - год, в который составлены топографические карты, а по ним определены площади и объёмы ледников; b<sub>СР</sub> - баланс внешнего массообмена 985 ледников Джунгарского Алатау в 1976/77 году, средний по режиму за 1966 - 1991 годы (рис. 4).



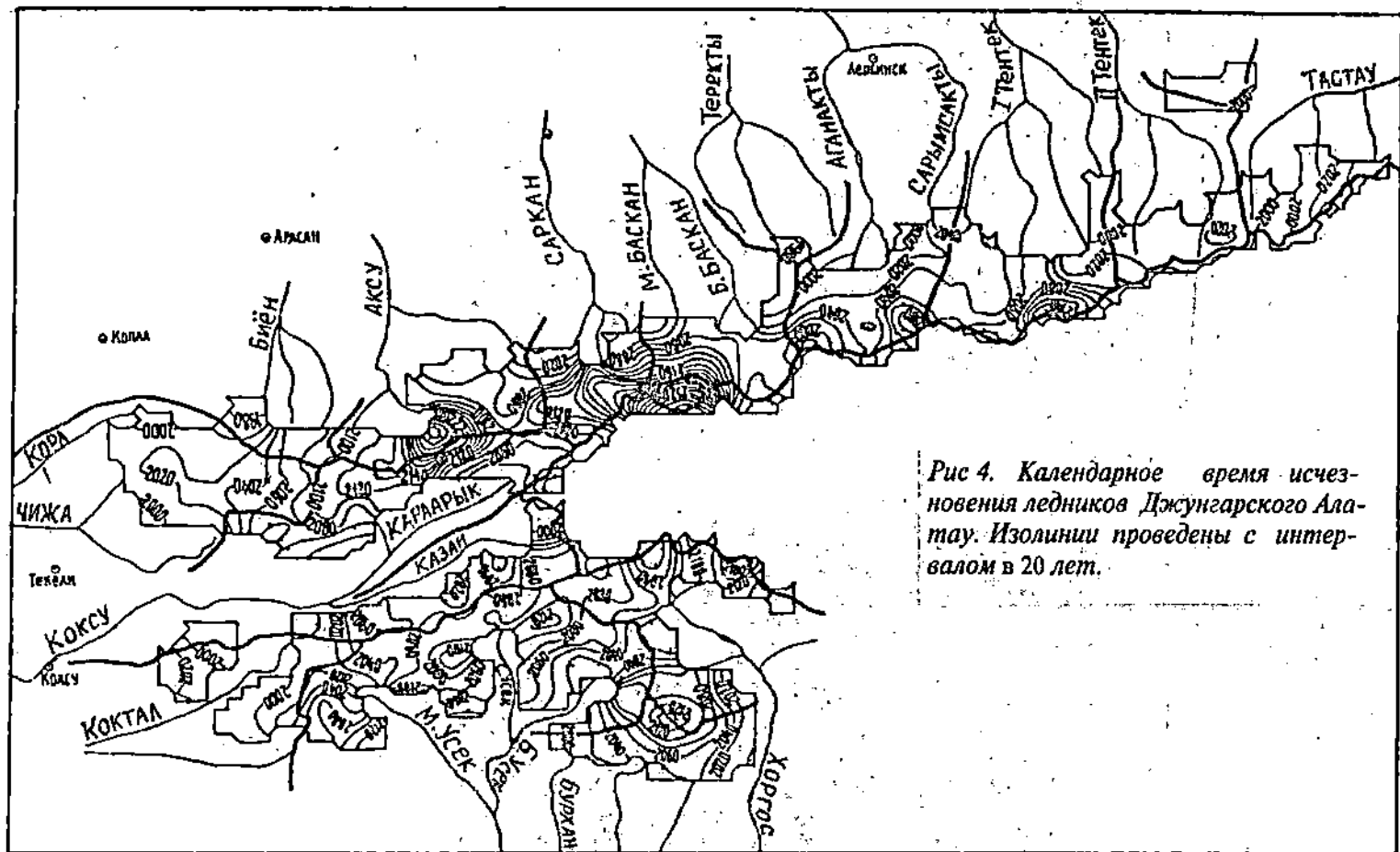


Рис 4. Календарное время исчезновения ледников Джунгарского Алатау. Изолинии проведены с интервалом в 20 лет.

В бассейнах рек западной ориентации стока, в силу описанных выше условий существования ледников, наблюдаются самые большие потери массы (1,1 % в год), что приводит их к самому неустойчивому состоянию. Исходя из запасов льда на 1970 г., эти ледники исчезнут через 90 лет, т.е. в 2060 г.  $\pm$  10 лет, при сохранении тенденции изменения климата.

В самых благоприятных условиях находятся ледники бассейнов рек северной ориентации стока, но потеря массы льда здесь идет неравномерно и зависит от географического места расположения бассейнов рек: на западной стороне (р. Биён) ежегодное изменение массы льда равно 0,76 %, они исчезнут через 130 лет (в 2100 году); восточнее, в наиболее высокой части Джунгарского Алатау (р. Баскан), ледники теряют всего 0,44 % массы и устойчивость их существования самая большая, 430 лет (до 2400 года); на восточной стороне хребта (р. Ыргайты) потеря массы достигает 1,33 % в год, через 70 лет (к 2040 году) ледников здесь уже не будет. В бассейнах южной ориентации стока ежегодные потери массы равны 0,96 %; им осталось существовать 100 лет (до 2070 года). Более активно ледники будут уменьшаться по всей периферии гор, хотя, как говорилось ранее, условия их питания там лучше, чем у ледников внутренних территорий. В связи с предполагаемым планетарным повышением температуры воздуха в результате антропогенной деятельности на 3-5 °С, названные скорости естественного исчезновения горных ледников возрастут.

В заключении отметим, что уменьшение запасов льда в горах отразится на доле ледниковых вод в стоке рек, изменится микроклимат гор и предгорных территорий в сторону увеличения засушливости; начнутся естественные изменения в сохранении и выживаемости растительного и животного мира; потребуются перестройка сельского хозяйства в направлении интенсификации производства на более ограниченных площадях; ориентирование промышленности на меньшее потребление воды и, по-видимому, работа по ограничению народонаселения на этих территориях. Учитывая вышесказанное, мониторинг горных ледников в ближайшие десятилетия будет играть решающую роль в оценке экологии предгорных территорий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мачерет Ю.Я., Черкасов П.А., Боброва Л.И. Толщина и объём ледников Джунгарского Алатау по данным аэrorадиозондирования // Материалы гляциологических исследований. - 1988. - Вып. 62. - С. 59 - 71.

2. Черкасов П.А. Сейсмическое зондирование ледников бассейна р. Аганакты Тентекской в хребте Джунгарский Алатау // Гляциологические исследования в Казахстане.- 1965. - Вып. 5. - С. 117-134.
3. Черкасов П.А., Никитин С.А. К методике расчёта объёма горных ледников по данным наземной и воздушной радиолокационной съёмки (на примере Джунгарского Алатау) // Ледники, снежный покров и лавины в горах Казахстана. - Алма-Ата: Наука, 1989.- С. 18-37.
4. Черкасов П.А. Расчёт составляющих водно-ледового баланса внутриконтинентальной ледниковой системы на примере Джунгарского Алатау // Автореферат диссертации на соискание учёной степени доктора географических наук.- М., - 1991.- 43 с.
5. Черкасов П.А., Ерисковская Л.А. Фазовый состав атмосферных осадков ледниковой зоны Джунгарского Алатау в тёплый период года // Материалы гляциологических исследований.- 1996. - Вып. 80.- С.154-157.
6. Driedger C.L., Kennard P.M. Glacier volume estimation on Cascade volcanoes: an analysis and comparison with other methods // Annals of Glaciology. - 1986.- Vol.8.- P.59-64.
7. Driedger C.L., Kennard P.M. The volumes on Cascade volcanoes: Mount Rainier, Mount Hood, Three Sisters and Mount Shasta // U.S. Geol. Sei. Profess. Pap.- 1987.- № 1365.- P:1-28.

Институт географии МН-АН РК

## ҚАЗАҚСТАННЫҢ ЭКОЛОГИЯЛЫҚ ЖӘНЕ ТАБИҒИ-РЕСУРСТЫҚ МҮМКІНДІГІН БАҒАЛАУДАҒЫ ТАУДЫҢ МҮЗДЫҚ ЖҮЙЕЛЕРІ МОНИТОРИНГІСІНІҢ РОЛІ

Геогр. ғ. докторы П.А. Черкасов

Муздықтар морфологиясын ескере отырып, оның көлемін анықтау әдісі бойынша Жоңғар Алатауында 42 км<sup>3</sup> жуық мұз бар екені анықталды. Мұздықтың физикалық жазықтығын ескере отырып олардың сыртқы масса айналымының құрамалары мен балансын есептейтін теориясы мен әдісінің маңызды қағидалары келтірілді. Тау бедерінің құрылысына және атмосфера айналымының ерекшеліктеріне байланысты Жоңғар Алатауындағы мұздық система бойынша олардың жазықтық өзгерушілігіне және тұрақтылығына сипаттама берілді. Климаттың өзгеру тенденциясы сақталған жағдайда бұл таулы аймақта орташа 100 жылдан кейін мұздықтардың маңызды мас-салары жойылады.