

П.С. БОРОДАВКО*, М.А. МЕЛЬНИК*, Е.С. ВОЛКОВА*, О. ДЕМБЕРЕЛ**

*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,
634055, Томск, пр. Академический, 10/3, Россия,
bor@ggf.tsu.ru, elevolko@yandex.ru, melnik-m-a@yandex.ru

**Ховдский государственный университет,
164300, Ховд, Жаргалант сум, 5, Монголия, icecore_ot@yahoo.com

ВНУТРИСТРУКТУРНАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ВОДНО-ЛЕДНИКОВЫХ РЕСУРСОВ ХРЕБТА ЦАМБАГАРАВ (МОНГОЛЬСКИЙ АЛТАЙ)

На основе полевых экспедиционных исследований и анализа полихронных данных космической съемки высокого разрешения, выполненного в ГИС-среде AlWaRes, получены новейшие данные о современном состоянии озерно-ледниковых ресурсов хр. Цамбагарав (Западная Монголия, Монгольский Алтай) и их изменении с максимума малой ледниковой эпохи XVII–XIX вв. Установлено, что в максимум трансгрессивной стадии малой ледниковой эпохи, с учетом 3D-топографии горно-ледниковых бассейнов, оледенение хребта охватывало 99,1 км², суммарный объем ледников достигал 4,72 км³. Выявлено, что последующая перестройка климата в постмаксимальную фазу малой ледниковой эпохи повлекла за собой пространственную трансформацию нивально-гляциального пояса хребта, выраженную в прогрессирующем сокращении размеров оледенения и апифтинге его нижних вертикальных пределов. К августу 2020 г. суммарная площадь оледенения хр. Цамбагарав сократилась до 65,21 км², а запасы льда уменьшились до 2,98 км³. Статистический анализ среднегодовой температуры воздуха северных регионов Западной Монголии, выполненный за полувековой период, показал ее устойчивый положительный тренд. На фоне увеличения среднегодовой температуры воздуха отмечается и рост температуры периода абляции (июнь–август). В поясе современной дегляциации хребта отмечено появление восьми приледниковых озер с суммарной площадью акватории в 0,34 км² и водозапасом в 1,26 млн т. Анализ материалов космической съемки с 1966 по 2020 г. показывает, что большая часть из них образовалась за последний полувековой период и приурочена к предпольям современных ледников. По зависимостям, разработанным в ходе выполнения исследований, рассчитаны показатели внутривидового перераспределения водозапасов из гляциальных систем в лимнические системы за период с максимума малой ледниковой эпохи до 2020 г.

Ключевые слова: Западная Монголия, оледенение, ГИС, климат, водные ресурсы, озера.

P.S. BORODAVKO*, M.A. MEL'NIK*, E.S. VOLKOVA*, O. DEMBEREL**

*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems,
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 634055, Tomsk, pr. Akademicheskii, 10/3, Russia,
bor@ggf.tsu.ru, elevolko@yandex.ru, melnik-m-a@yandex.ru

**Khovd State University, 164300, Khovd, Zhargalantsum, 5, Mongolia, icecore_ot@yahoo.com

INTRASTRUCTURAL TRANSFORMATION OF WATER-GLACIAL RESOURCES OF TSAMBAGARAV RIDGE (MONGOLIAN ALTAI)

Based on field expedition research and analysis of high-resolution polychronous satellite imagery data carried out in AlWaRes GIS environment, the latest data on the modern state of lake-glacial resources of Tsambagarav Ridge (Western Mongolia, Mongolian Altai), and their changes since the maximum of the Little Ice Age of the 17th–19th centuries were obtained. It was found that at the maximum transgressive stage of the Little Ice Age, with 3D topography of mountain-glacial basins taken into account, the glaciation of the ridge covered 99.1 km², and the total volume of glaciers reached 4.72 km³. The subsequent climate changes during the post-maximum phase of the Little Ice Age entailed a spatial transformation of the nival-glacial belt of the ridge, implying a progressive reduction in the size of the glaciation and the uplifting of its lower vertical limits. By August 2020, the total glaciation area of Tsambagarav Ridge decreased to 65.21 km² and ice reserves decreased to 2.98 km³. A statistical analysis of the mean annual air temperature of the northern regions of Western Mongolia over a half-century period showed a steady positive trend. A rise of annual air temperature was also accompanied by a decrease in temperature during the ablation period (June–August). In the modern deglaciation belt of the ridge, eight glacial lakes have appeared with a total water area of 0.34 km² and a water reserve of 1 260 000 t. Analysis of satellite imagery from 1966 to 2020 shows that most of them have

formed in the last half a century and are confined to the pre-glacial margins of modern glaciers. Dependencies developed in the course of the study are used to calculate the indicators of intrastructural redistribution of water storage from glacial to limnic systems from the maximum of the Little Ice Age to 2020.

Keywords: *Western Mongolia, glaciation, GIS, climate, water resources, lakes.*

ВВЕДЕНИЕ

Со времени Малой ледниковой эпохи (МЛЭ) [1–4] высотный и широтный диапазоны распространения криогенных образований Земли неуклонно сужаются, что выражается в прогрессирующем сокращении гляциосферы [5, 6]. Подчиняясь глобальным климатическим тенденциям [7, 8], оледенение Алтая (Русского, Монгольского, Китайского, Казахстанского) на протяжении 150 лет находится в стадии устойчивой регрессии, а ледники его основных центров демонстрируют отрицательный баланс массы и уменьшают занимаемую площадь [9–13]. Рассматривая деградацию оледенения Алтая с позиций гидрологического ресурсоведения, можно сделать неутешительный вывод об истощении водных ресурсов и перспективном снижении водообеспеченности прилегающих регионов. Однако исследования, выполненные нами в одном из ледниковых центров Алтая, показывают, что процесс современной дегляциации сопровождается формированием приледниковых озерных систем, количество которых возрастает пропорционально темпам сокращения оледенения. В рамках научной проблематики данная тенденция определяется нами как внутривидовая трансформация статических (вековых) водных ресурсов, выраженная в направленном перераспределении водозапаса из ледниковых систем в озерные. Изучение закономерностей и масштабов данного процесса, темпов климатических изменений, влияющих на него, представляет собой важную задачу современных географических исследований. Актуальность данного направления определяется, прежде всего, растущим дефицитом пресных вод и возрастающей необходимостью их рационального использования.

Анализ публикаций по обозначенной тематике показывает, что проблема эволюции статических водных ресурсов Алтая как единой системы остается открытой, несмотря на значительный прогресс в исследовании ее отдельных компонентов (наземного и подземного видов оледенения [9, 14–17], озерного покрытия [18–20]) и их роли в планетарном влагообороте.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ

Монгольский Алтай — горная система, состоящая из нескольких параллельных хребтов, протянувшихся на 1000 км с севера на юго-восток и разделенных продольными тектоническими впадинами. Высота основных хребтов Монгольского Алтая варьирует в пределах 3200–3500 м над ур. моря. Продолжение Монгольского Алтая — более низкие, не образующие единого массива хребты Гобийского Алтая. Северо-восточная часть системы граничит с котловиной Больших озер. С севера Монгольский Алтай примыкает к Горному Алтаю. Основной орографический узел Монгольского Алтая — массив Табын-Богдо-Ола (гора Найрамдал — 4356 м над ур. моря).

Характерной чертой атмосферной циркуляции региона является преобладание в течение всего года западного переноса воздушных масс и развитие циклонической деятельности на арктическом и полярных фронтах. Более половины зимнего количества осадков выпадает в первую половину зимы (с ноября по декабрь), характеризующуюся неустойчивой циклонической погодой. Основной же период зимы (с января по март) проходит на фоне высокого давления. Количество осадков в это время невелико. Весной вследствие усиления циклонической деятельности количество осадков несколько увеличивается и к июлю достигает максимума [21].

Хребет Цамбагарав приурочен к центральной части Монгольского Алтая (в пределах 90°50'10,61"–90°50'47,20" в. д. и 48°39'03,64"–48°40'52,35" с. ш.) и граничит с котловиной Больших озер. Плановые очертания хребта имеют трапецевидную форму, а его пределы протягиваются в северо-западном направлении на 30–35 км, а в меридиональном — на 25 км. По морфоструктурным признакам он относится к системе Хунгийн-Нуруу и представляет собой сильно расчлененное высокогорье.

Хребет Цамбагарав составляют три горных массива: Цаст-ул (4193 м над ур. моря), Хух-нуруу-ул (4165 м над ур. моря) и Ямат-ул (3903 м над ур. моря). Абсолютные высоты в пределах массивов изменяются от 2840 до 4193 м. В нивально-гляциальном поясе хребта сосредоточено 40 ледников [22, 23]. Региональные климатические условия и особенности топографии определили пространственное распределение и морфологию ледниковых образований (долинных, карово-долинных, каровых, висячих и ледников плоских вершин) [23].

Для систематизации, аналитической обработки и отображения пространственно координированных данных о водно-ледниковых ресурсах Алтая нами разработана геоинформационная система AlWaRes (Altai Water Resources). ГИС AlWaRes создавалась на персональных компьютерах на базе Intel-процессоров в операционной среде Windows 7.0®. В качестве основного программного обеспечения ГИС был выбран комплекс программных средств Microdem/TerraBaseII V 12.0 и Global Mapper V 16.0®. Они успешно работают со всевозможными форматами геоданных и имеют преимущества работы в локальной сети по технологии «клиент-сервер». Microdem/TerraBaseII и Global Mapper V 16.0® представляют собой простые и эффективные средства для доступа к пространственным данным, их визуализации, анализа и хранения.

Структура разработанной нами ГИС AlWaRes включает следующие компоненты: банк данных, программно-аппаратный комплекс и средства создания оперативных материалов для разработки прогнозных заключений. Банк данных служит информационной основой ГИС, его состав и структура определялись составом входных и выходных данных, необходимых для решения функциональных задач по теме исследования. Банк данных ГИС состоит из картографического архива, тематических баз данных в формате DBase и материалов дистанционного зондирования. Векторные цифровые карты в ГИС представлены в формате Shape-файлов. Наличие цифровой топографической основы позволило привести к единой системе координат цифровые тематические карты и материалы дистанционного зондирования. В качестве цифровой модели рельефа использованы планшеты Aster GDEM, SRTM матриц третьего поколения и DTED level 3.

Фактологические данные в ГИС AlWaRes представлены совокупностью отдельных тематических баз данных, атрибутивных таблиц цифровых слоев в виде файлов формата DBase и газетиров (географических справочников) в текстовом формате. Структура тематических баз данных создавалась по реляционному типу.

Картирование современных границ ледников и моренных комплексов хр. Цамбагарав производилось оцифровкой инструментами Microdem/TerraBaseII V 12.0 в режиме «Stream» по растровой подложке летних сцен мультиспектральных Канопус-В МСС, Ресурс-П Геотон Мультиспектр и монохромных космических изображений [24] с пространственным разрешением от 1 до 3,5 м за период с 2017 по 2020 г. Все имеющиеся сцены в формате GeoTiff были преобразованы в единую картографическую проекцию (46 зона UTM, WGS84), геотрансформированы с помощью матриц Aster GDEM и координат реперных точек, подготовленных в ходе проведения полевых экспедиционных исследований. Для минимизации ошибок картографирования заморенных участков краевых частей ледников использовались GPS-треки их контуров, с точностью позиционирования до 1 м.

Пространственное положение ледников середины 1960-х гг. картировалось по монохромным геотрансформированным и геореферированным электронным скан-копиям отпечатков космоснимков миссии Согона [25]. Расчет 3D площадей ледников проводился в Global Mapper V 16.0® с использованием цифровой модели рельефа ASTER GDEM третьего поколения с разрешением 1 arcsec. Объемы ледников вычислялись по зависимости, установленной сотрудниками Института географии РАН [26], основанной на связи между объемом V и площадью S ледников в виде степенной функции:

$$V = k S^p, \quad (1)$$

где k и p — эмпирические коэффициенты, рекомендованные для разных морфологических типов ледников Алтая: каровых (0,048/1,222), карово-долинных (0,049/1,048), долинных (0,034/1,337), плоских вершин (0,044/0,89).

Озерное покрытие горно-ледниковых бассейнов картировалось по прямым признакам дешифрирования мультиспектральных и панхроматических космоснимков высокого и сверхвысокого разрешения. Главными дешифровочными признаками озерных водоемов были: ровный фототон и специфическая монотонная или выразительная структура изображения воды; овальная форма озер и приуроченность водоемов к пониженным элементам рельефа. Озера картировались, когда становилась различимой их форма. Основные гидрографические характеристики водоемов (площадь акватории, длина береговой линии, отметка уреза) рассчитывались программными средствами ГИС. Объемы озерных вод вычислялись двумя способами: по зависимости К. Хюгелля [27] с использованием формулы

$$V = 0,104 A^{1,42} \quad (2)$$

и по формуле, предложенной С. Эвансом [28]:

$$V = 0,035 A^{1,5}, \quad (3)$$

где V — объем воды водоема, м³; A — площадь водоема, м².

Для верификации полученных значений была проведена батиметрическая съемка приледникового озерного комплекса бассейна р. Тумурта. Измерения проведены с помощью сонара GPSMAP 585 Plus со встроенным GPS-ресивером. Результаты эхолотирования обработаны в Garmin Quickdraw Contours, на основании чего были построены карты глубин водоемов и установлены их истинные объемы. Невязка измеренных объемов с рассчитанными по формуле (2) составила в среднем $\pm 15\%$, по формуле (3) — $\pm 12\%$.

Исследования изменений климатического фона на территории северо-западной Монголии выполнены посредством аналитической обработки рядов метеоданных NOAA's National Centers for Environmental Information (NCEI) по метеостанциям Ховд ($48^{\circ}01'$ с. ш. $91^{\circ}34'$ в. д.), Ульгий ($48^{\circ}56'$ с. ш. $89^{\circ}56'$ в. д.), Улангом ($49^{\circ}59'$ с. ш. $92^{\circ}05'$ в. д.) и Толбо ($48^{\circ}25'$ с. ш. $90^{\circ}18'$ в. д.). Метеостанции наиболее приближены к объекту исследований и имеют относительно полные и непрерывные ряды данных по температуре и осадкам в исследуемом регионе. Для характеристики изменения температурного режима был проанализирован период с 1960 по 2021 г.; динамика режима осадков рассматривалась с 1998 по 2021 г.

Математическая обработка метеоданных NCEI проводилась методом конвертирования значений в приложение Excel, где показатели из традиционной U.S. Customary System переводились в международную систему единиц (СИ).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ изменений климатического фона северо-западной Монголии за последние десятилетия показал следующее. Среднегодовая температура воздуха на мст Улангом увеличилась на $2,46^{\circ}\text{C}$, на мст Ховд — на $2,81$, на мст Ульгий — на $2,23^{\circ}\text{C}$ (табл. 1). По данным мст Толбо, рост среднегодовой температуры воздуха составил $0,61^{\circ}\text{C}$. Невысокое значение показателя по этой станции объясняется коротким рядом доступных метеоданных, представленных только за последний 20-летний период.

Средняя температура воздуха периода абляции (май–август) за исследуемый период также увеличивается (табл. 2): для мст Улангом рост составляет $2,4^{\circ}\text{C}$, для мст Ховд — $2,6$, для мст Ульгий — $2,2^{\circ}\text{C}$. На основе более детального анализа изменений температурного режима абляционного периода нами выделены два временных отрезка: 1965–1997 и 1998–2021 гг., имеющих определенные

Таблица 1

Анализ среднемноголетней годовой температуры воздуха северо-западной Монголии с 1960 по 2021 г.

Метеостанция	h_{abs} , м	$\bar{T}$, $^{\circ}\text{C}$	Δt , $^{\circ}\text{C}$	k	σ , $^{\circ}\text{C}$
Ульгий	1715	0,98	2,23	0,036	1,08
Ховд	1405	0,80	2,81	0,053	1,04
Улангом	939	–2,39	2,46	0,041	1,24
Толбо*	2101	–2,39	0,61	0,032	0,70

Примечание. h_{abs} — абсолютная высота над уровнем моря, $\bar{T}$ — среднегодовая температура, Δt — изменение среднегодовой температуры, k — коэффициент тренда, σ — среднеквадратичное отклонение.

* — данные за период с 2002 по 2021 г.

Таблица 2

Анализ среднемноголетней температуры абляционного периода северо-западной Монголии с 1965 по 2021 г.

Метеостанция	$\bar{T}$, $^{\circ}\text{C}$	σ , $^{\circ}\text{C}$	Δt , $^{\circ}\text{C}$	$\bar{T}_1$, $^{\circ}\text{C}$	σ_1 , $^{\circ}\text{C}$	$\bar{T}_2$, $^{\circ}\text{C}$	σ_2 , $^{\circ}\text{C}$	$\bar{T}_1 - \bar{T}_2$, $^{\circ}\text{C}$
Ульгий	13,28	0,93	+2,2	12,73	0,64	14,00	0,60	1,27
Ховд	15,66	1,04	+2,6	14,99	0,64	16,58	0,75	1,59
Улангом	15,39	0,93	+2,4	14,83	0,60	16,12	0,61	1,29
Толбо	—	—	—	—	—	9,83	0,59	–0,01

Примечание. $\bar{T}$ — среднемноголетняя температура за 1965–2021 гг., Δt — изменение среднегодовой температуры по тренду, σ — среднеквадратичное отклонение температуры воздуха за 1965–2021 гг., $\bar{T}_1$ — средняя температура за 1965–1997 гг., σ_1 — среднеквадратичное отклонение температуры воздуха за 1965–1997 гг., $\bar{T}_2$ — средняя температура за 1998–2021 гг., σ_2 — среднеквадратичное отклонение температуры воздуха за 1998–2021 гг. Прочерк — данные отсутствуют.

различия в трендах температурных изменений. Установлено, что среднее значение температуры воздуха в 1998–2021 гг. более чем на 1,25 °С выше аналогичного показателя в 1965–1997 гг. Период максимального увеличения температуры отмечается с 1993 по 1998 г.

Анализ режима атмосферных осадков с 1998 по 2021 г. свидетельствует о незначительном снижении зимних осадков, начиная с зимы 2016–2017 гг. (рис. 1). Для мст Ховд среднее значение суммы зимних осадков в период с 2000–2021 гг. составляет 24,7 мм, однако среднеквадратичное отклонение $\sigma = 19,2$ свидетельствует о высокой вариативности данного показателя. Тренд горизонтальный, следовательно, уменьшения или увеличения зимних осадков, по данным за исследуемый период, не наблюдается. Обращает на себя внимание зимний период 2011–2012 гг., когда сумма зимних осадков составила 100,3 мм — максимальное значение для этой станции за исследуемый период (см. рис. 1, а).

Для мст Ульгий показатель суммы зимних осадков демонстрирует ярко выраженный колебательный характер (см. рис. 1, б). Среднее значение суммы зимних осадков в период 2000–2021 гг. также невысокое и составляет 15,75 мм, $\sigma = 10,92$. Тренд показывает сокращение зимних осадков, главным образом, за счет периода с 2017 по 2021 г. Уменьшение зимних осадков по тренду за 2000–2021 гг. составляет 15,3 мм. Необходимо заметить, что для данной станции это происходит на фоне увеличения годового количества осадков за этот же период. Для мст Улангом среднее значение суммы зимних осадков в период с 2000–2021 гг. составляет 39,98 мм, $\sigma = 12,77$. Тренд показывает повышение суммы зимних осадков (см. рис. 1, в). Увеличение зимних осадков по тренду за 1998–2021 гг. составляет 14,28 мм. Наименьшее значение этого показателя пришлось на зимние периоды 2004–2005 и 2011–2012 гг.

Изменения климатического фона северо-западной Монголии, отмеченные за последние десятилетия, представляют собой главные факторы новейшей трансформации элементов нивально-гляциального пояса хр. Цамбагарав, выраженной в прогрессирующем сокращении размеров оледенения и апифтинге его нижних вертикальных пределов.

Ледниково-аккумулятивный рельеф верхних частей большинства долин хребта представлен моренными комплексами Малой ледниковой эпохи с хорошо выраженными валами фронтальных морен.

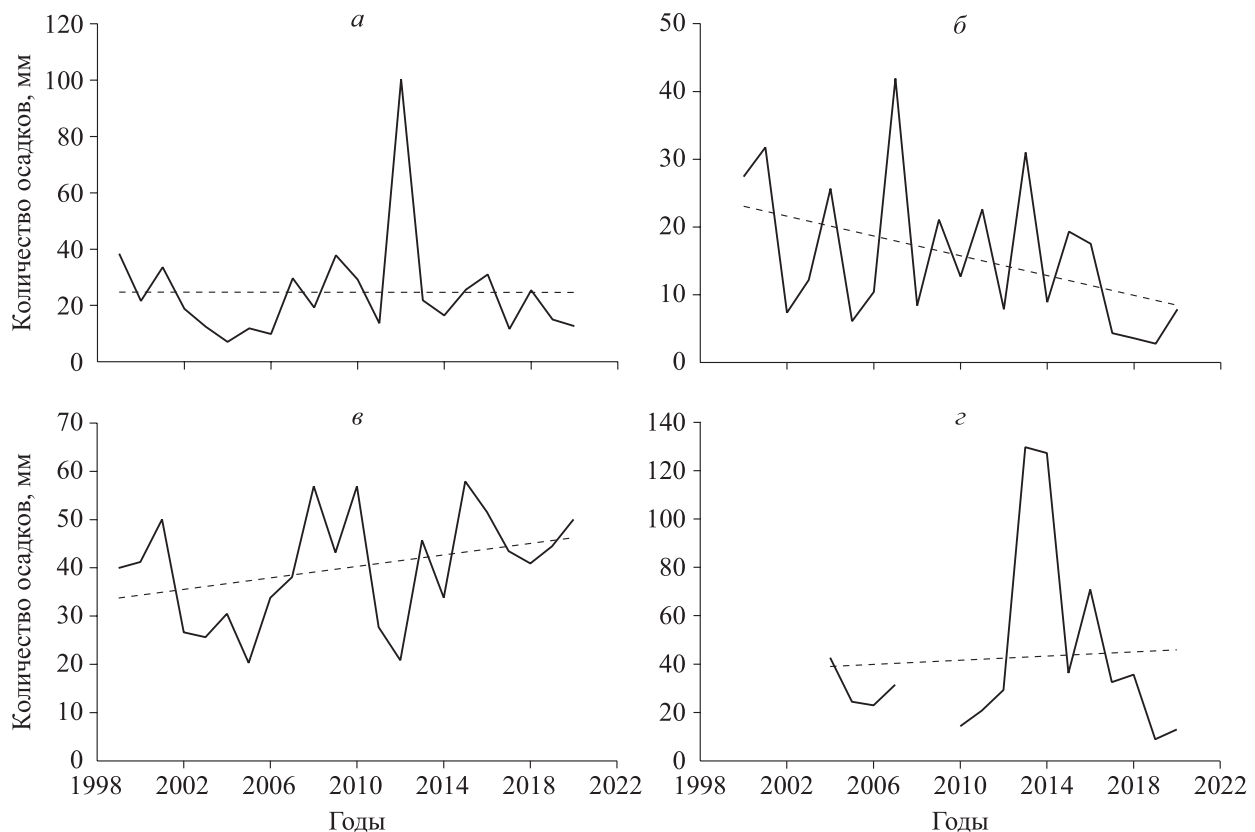


Рис. 1. Динамика количества зимних осадков в период с октября по апрель для метеостанций:

а — Ховд; б — Ульгий; в — Улангом; z — Толбо.

Надежно распознаваемые на материалах космосъемки, данные объекты использовались нами в качестве исходных реперов для реконструкции и картографирования пространственного положения глетчеров в период последней ледниковой экспансии. С учетом 3D топографии горно-ледниковых бассейнов в максимум трансгрессивной стадии МЛЭ оледенение охватывало 99,1 км² территории хребта, мощность долинных ледников в бассейнах рек Хар-Асга, Ямаат, реконструированная по гипсометрии береговых морен, в два раза превосходила современную, а суммарный объем льда составлял 4,72 км³. К августу 2020 г. суммарная площадь оледенения хр. Цамбагарав сократилась до 65,21 км², а запасы льда, рассчитанные нами по математическим зависимостям [22], уменьшились до 2,98 км³.

В поясе современной дегляциации хребта, в пределах моренных комплексов Малой ледниковой эпохи горно-ледниковых бассейнов рек Нурганы, Ямаат, Тумурт Цаган-гол, зафиксировано появление восьми приледниковых озер с суммарной площадью акватории в 0,34 км², общим объемом 0,00126 км³ и водозапасом в 1,26 млн т. (рис. 2).

Неравномерность распределения озер по горно-ледниковым бассейнам продиктована их морфологическими особенностями: большая часть озерных водоемов приурочена к пологим предпольям долинных и карово-долинных ледников с хорошо выраженными краевыми моренными комплексами, которые либо выступают в роли естественных дамб, либо обеспечивают условия для развития термокарстового лимногенеза. В бассейнах с доминантой ледников плоских вершин или присклонового типа условия для формирования водоемов отсутствуют. Сравнительный анализ материалов космической съемки с 1968 по 2020 г. показывает, что большая часть озер образовалась за последний полувековой период. Наглядным примером формирования озерной системы в горно-ледниковых бассейнах выступает приледниковое озеро в долине р. Тумрута (рис. 3, а). Изменение положения ледника, изображенное на фрагментах космоснимков КН-4В (1968-08-11) и WorldView-110 (2015-08-19) с 1968 по 2015 г. (см. рис. 3, б), соотносимо с современными границами озерных водоемов (см. рис. 3, в).

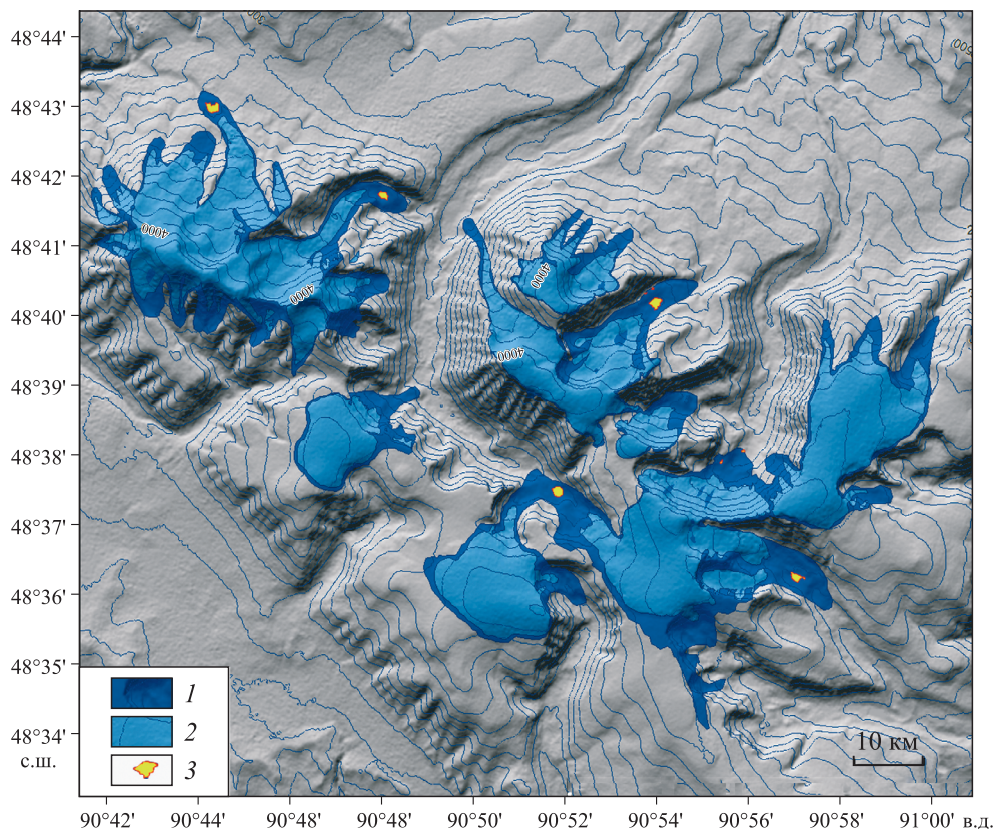


Рис. 2. Сокращение оледенения хребта Цамбагарав.

1 — распространение ледников в максимум МЛЭ; 2 — ледники в современных границах; 3 — приледниковые озера, образованные в постмаксимум МЛЭ.

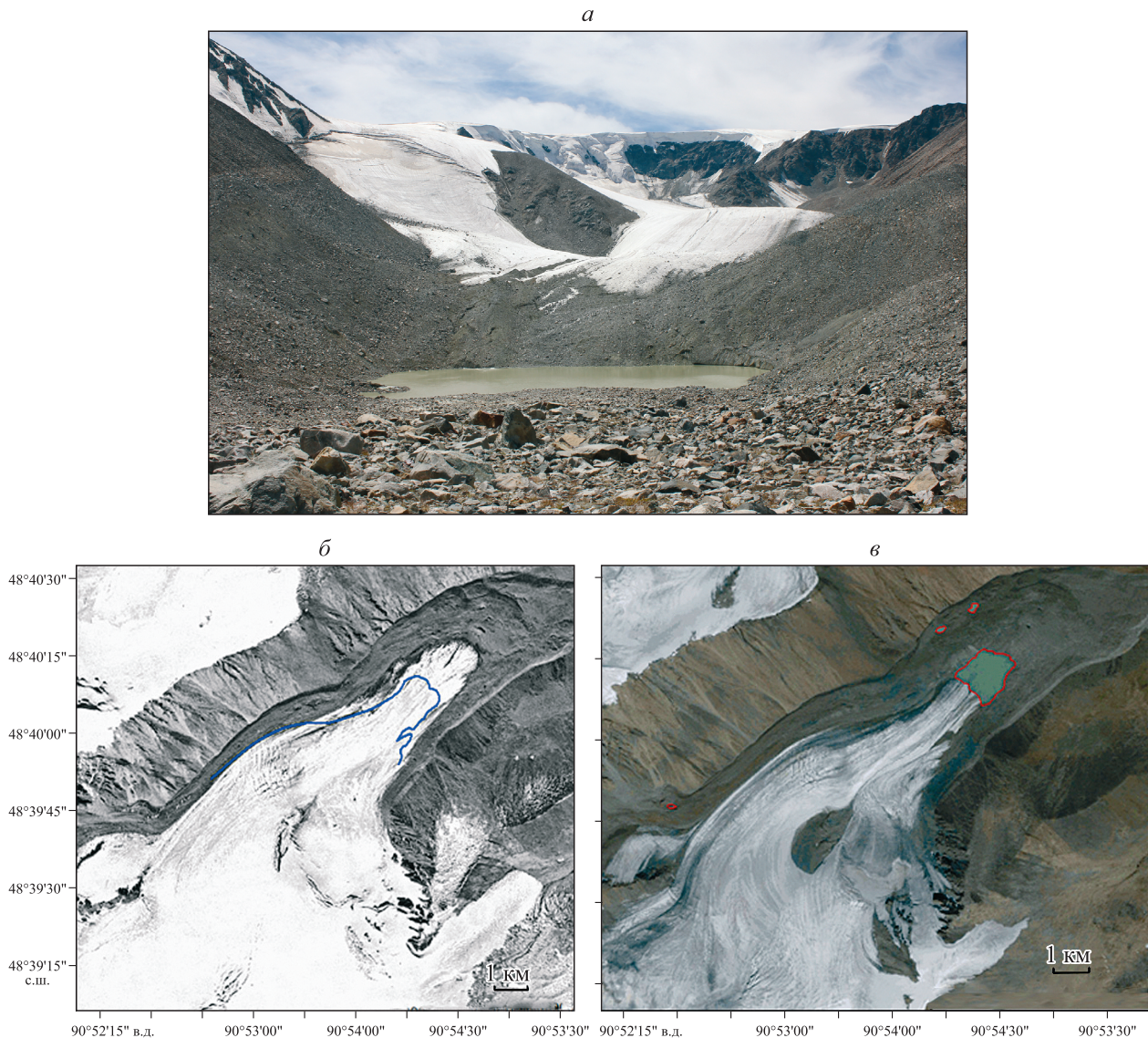


Рис. 3. Процесс формирования озерной системы в горно-ледниковом бассейне р. Тумурт.

a — приледниковое озеро в долине р. Тумурта (фото П.С. Бородавко); *б* — изменение положения ледника с 1968 по 2015 г. (маркировано синей линией); *в* — современные озерные водоемы (маркированы красной линией).

Полученные в ходе исследования данные позволяют рассчитать долю перераспределения водозапасаов хр. Цамбагарав из ледниковых систем (в водном эквиваленте) в озерные системы с максимума Малой ледниковой эпохи. Расчеты проводились по следующей формуле:

$$k = \frac{V_{\Sigma \text{lim}} \cdot \rho_w}{\Delta V_{\text{gl}} \cdot \rho_{\text{gl}}} \cdot 100 \%, \quad (4)$$

где k — доля перераспределения водозапасаов, %; ΔV_{gl} — разность объемов современного ледника (группы ледников) и ледника (группы ледников) в пространственных границах заданного хронологического рубежа, км³; $V_{\Sigma \text{lim}}$ — суммарный объем воды в озере или озерной системе, расположенной в пределах зоны дегляциации, км³; ρ_{gl} — плотность льда, г/см³; ρ_w — плотность воды, г/см³.

Разность в объеме ледников хр. Цамбагарав в МЛЭ и по состоянию на 2020 г. составляет 1,74 км³, суммарный объем озерных водоемов — 0,00126 км³.

Если принять плотность льда равной 0,9 г/см³, а плотность воды — 1 г/см³, то процентное значение перераспределенных водозапасаов хребта, рассчитанное по формуле (4), составит 0,08 %. При

этом данный показатель может существенно возрастать в горно-ледниковых бассейнах с высоким коэффициентом озерности и закономерно уменьшаться при отсутствии озерных водоемов в пределах краевых моренных комплексов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе полевых экспедиционных исследований и анализа полихронных данных космической съемки высокого разрешения, выполненного в ГИС среде AlWaRes, получены новейшие данные о современном состоянии озерно-ледниковых ресурсов хр. Цамбагарав и их изменении с максимума малой ледниковой эпохи.

Нами установлено, что изменения климатического фона северно-западной Монголии за последние десятилетия выразились в увеличении значений среднемноголетней годовой температуры, среднемноголетней температуры абляционного периода и незначительном снижении количества зимних атмосферных осадков. Выявлено, что на фоне климатически обусловленного сокращения ледовых запасов хребта его озерные ресурсы закономерно наращивают свой потенциал. Происходит направленное перераспределение водозапаса из гляциальных в озерные системы, что в будущем позитивно отразится на водных ресурсах хребта, даже при полном исчезновении ледников. По зависимостям, разработанным в ходе выполнения исследований, рассчитаны показатели внутривидового перераспределения водозапаса из гляциальных в лимнические системы с максимума малой ледниковой эпохи к 2020 г. Площади оледенения впервые рассчитаны с учетом трехмерной топографии горно-ледниковых бассейнов.

Учитывая весомую роль ледников и озер в системе влагооборота, формировании и регулирования стока, полученные результаты будут иметь важное значение, как в теоретическом, так и в практическом аспектах, поскольку недооценка или переоценка доступных запасов воды в будущем может иметь негативные последствия, как для местного населения, так и для системы хозяйствования в целом.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Министерства образования, культуры, науки и спорта Монголии (20–55–44008). Анализ изменения климатического фона выполнен в рамках государственного задания Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (FWRG–2021–0003).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Машошина И.А.** Малая ледниковая эпоха на Алтае (по материалам путешествий XVII–XIX вв.) // Вопросы географии. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 2003. — С. 67–71.
2. **Ганюшкин Д.А., Москаленко Ю.П., Селиверстов И.Г.** Оледенение массива Монгун-Тайга (Внутренняя Азия) в максимум малой ледниковой эпохи, и его эволюция // Вест. Санкт-Петербург. ун-та. Сер. 7. Геология. География. — 1998. — № 4. — С. 27–37.
3. **Малолетко А.М.** Западная Сибирь в Малую ледниковую эпоху (1550–1850 гг.) // География и природопользование Сибири. — 2003. — № 6. — С. 8–25.
4. **Жилина Т.Н.** Малый ледниковый период как одно из колебаний климата в голоцене и его последствия в Западной Сибири // Вест. Томск. ун-та. — 2010. — № 340. — С. 206–211.
5. **Носенко Г.А., Никитин С.А., Хромова Т.Е.** Изменение площади и объема ледников Горного Алтая (Россия) с середины XX в. по данным космических съемок // Лед и Снег. — 2014. — № 2 (54). — С. 5–13.
6. **Ganiushkin D., Chistyakov K., Kunaeva E.** Fluctuation of glaciers in the southeast Russian Altai and northwest Mongolia Mountains since the Little Ice Age maximum // Environmental Earth Sciences. — 2015. — Vol. 74. — P. 1883–1904.
7. **Доклад** об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. — М.: Росгидромет, 2021. — 104 с.
8. **Mongolia Second Assessment Report on Climate Change (MARCC-2014).** — Ulanbataar: Ministry of Environment and Green Development of Mongolia, 2014. — 302 p.
9. **Ревякин В.С., Мухаметов Р.М.** Динамика ледников Алтае-Саянской горной системы за 150 лет // Материалы гляциолог. исслед. — 1986. — Вып. 57. — С. 95–99.
10. **Shahgedanova M., Nosenko G., Khromova T., Muraveyev A.** Glacier shrinkage and climatic change in the Russian Altai from the mid 20th century: An assessment using remote sensing and PRECIS regional climate model // Journ. of Geophysical Research. — 2010. — Vol. 115 (D16). — DOI: 10.1029/2009JDO12976
11. **Pan C.G., Pope A., Kamp U., Dashtseren A., Walther M.P., Syromyatina M.V.** Glacier recession in the Altai Mountains of Mongolia in 1990–2016 // Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography. — 2018. — Vol. 100. — P. 185–203.

12. Plyusnin V., Zehong L., Xiaona C. The Response of Glaciers to Global Warming in the Mountains of Eastern Siberia, Mongolia, and Northwest China // *Geography and Natural Resources*. — 2021. — Vol. 42. — P. 306–314.
13. Khrutsky V.S., Golubeva E.I. Dynamics of the glaciers of the Turgen-Kharkhira mountain range (Western Mongolia) // *Geography and Natural Resources*. — 2008. — Vol. 29. — P. 278–287.
14. Галахов В.П., Мухаметов Р.В. Ледники Алтая. — Новосибирск: Наука, 1999. — 136 с.
15. Нарожный Ю.К., Никитин С.А. Современное оледенение Алтая на рубеже XXI века // *Материалы гляциолог. исслед.* — 2003. — Вып. 95. — С. 93–101.
16. Klinge M., Schlütz F., Zander A., Hülle D., Batkhishig O., Lehmkuhl F. Late Pleistocene lake level, glaciation and climate change in the Mongolian Altai deduced from sedimentological and palynological archives // *Quaternary Research*. — 2021. — Vol. 99. — P. 168–189.
17. Bantsev D.V., Ganyushkin D.A., Chistyakov K.V., Volkov I.V., Ekaykin A.A., Veres A.N., Tokarev I.V., Shtykova N.B., Andreeva T.A. The Components of the Glacial Runoff of the Tsambagarav Massif from Stable Water Isotope Data // *Geosciences*. — 2019. — Vol. 9 (7). — P. 297.
18. Пряхина Г.В., Кашкевич М.П., Попов С.В., Распутина В.А., Боронина А.С., Ганюшкин Д.А., Агатова А.Р., Непоп Р.К. Формирование и развитие моренного (приледникового) озера Нурган, северо-западная Монголия // *Криосфера Земли*. — 2021. — Т. 25, № 4. — С. 26–35.
19. Walther M.P., Dashtseren A., Kamp U., Temujin K., Meixner F.X., Pan C.G., Gansukh Y. Glaciers, Permafrost and Lake Levels at the Tsengel Khairkhan Massif, Mongolian Altai, During the Late Pleistocene and Holocene // *Geosciences*. — 2017. — Vol. 7 (3). — DOI: 10.3390/geosciences7030073
20. Oh J., Seong Y.B., Hong S., Yu B. Paleo-shoreline changes in moraine dammed lake Khagiin Khar, Khentey Mountains, Central Mongolia // *Journ. of Mountain Science*. — Vol. 16. — P. 1215–1230.
21. Volkova E.S., Melnik M.A., Borodavko P.S. Climate-related transformation of the nival-glacial landscapes of western Mongolia and their consequences // *Advances in Current Natural Sciences*. — 2018. — N 11 (2). — P. 311–316.
22. Ганюшкин Д.А., Отгонбаяр Д., Чистяков К.В., Кунаева Е.П., Волков И.В. Современное оледенение хребта Цамбагарав (северо-западная Монголия) и его изменение с максимума малого ледникового периода // *Лед и Снег*. — 2016. — № 4 (56). — С. 437–452.
23. Отгонбаяр Д. Современное оледенение Монгольского Алтая (на примере хребтов Мунххайрхан, Сутай, горного узла Цамбагарав). — Барнаул: Бизнес-Коннект, 2013. — 156 с.
24. Геопортал Роскосмоса [Электронный ресурс]. — <https://gptl.ru/> (дата обращения 20.03.2022).
25. EarthExplorer USGS [Электронный ресурс]. — <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения 15.02.2022).
26. Мачерет Ю.Я., Кутузов С.С., Мацковский В.В., Лаврентьев И.И. Об оценке объема льда горных ледников // *Лед и Снег*. — 2013. — № 1 (121). — С. 5–15.
27. Huggel C., Kaab A., Haeblerli W., Teyssie P., Paul F. Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: a case study in the Swiss Alps // *Can. Geotech. Journ.* — 2002. — Vol. 39. — P. 316–330.
28. Evans S.G. Landslide damming in the Cordillera of Western Canada // *Landslide dams: processes, risk, and mitigation* — 1986. — N 3. — P. 111–130.

Поступила в редакцию 21.03.2022

После доработки 26.05.2022

Принята к публикации 05.07.2022