

УДК 551.324

## Сокращение ледников гор Сунтар-Хаята и методические аспекты его оценки

© 2013 г. А.А. Галанин<sup>1</sup>, В.М. Лыткин<sup>1</sup>, А.Н. Федоров<sup>1</sup>, Т. Кадота<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт мерзлотоведения СО РАН имени П.И. Мельникова, Якутск;

<sup>2</sup>Исследовательский институт глобальных изменений, Йокосука, Япония

*agalalin@gmail.com*

*Статья принята к печати 2 июня 2013 г.*

Высота границы питания, оледенение северо-востока Азии, сокращение ледников, горы Сунтар-Хаята.  
ELA, glaciation of Northeastern Asia, glaciers shrinking, Suntar-Khayata Mountains.

Изучение гляциально-криогенных комплексов гор Сунтар-Хаята – логическое продолжение исследований, начатых М.М. Корейшей в 1957–1959 гг. Рассматриваемый участок расположен в верхнем течении р. Бур-гали, на северном склоне г. Мус-Хая (2959 м над ур. моря), где находятся ледники № 29–31 согласно Каталогу ледников. Наше исследование основано на полевой геоморфологической съёмке, выполненной в 2012 г., и пространственном анализе разновременной аэрокосмической съёмки высокого разрешения (0,6–1 м). В настоящее время абсолютная высота краевых частей исследованных 16 ледников варьирует от 2090 до 2350 м, а среднее значение абсолютной высоты краёв ледников выросло с  $2052 \pm 102$  м до  $2226 \pm 114$  м по сравнению со съёмкой 1945 г. За это же время края ледников отступили на 500–650 м, а нижняя граница области питания повысилась на  $61 \pm 38$  м – с  $2346 \pm 56$  до  $2407 \pm 55$  м над ур. моря. Площадь оледенения массива г. Мус-Хая сократилась примерно на 36%. В результате абляции поверхность ледника № 31 в краевой части понизилась на 50–70 м. Выполненная оценка характеризует сокращение только открытой части ледников, поскольку значительная часть ледникового льда погребена под абляционными моренами, а также законсервирована в телах приледниковых каменных глетчеров и других гляциально-криогенных образований. Мощности некоторых из них достигают 30–80 м. Установлено сокращение поверхностной скорости течения ледников в 5–6 раз по сравнению с оценками 1957–1959 гг.

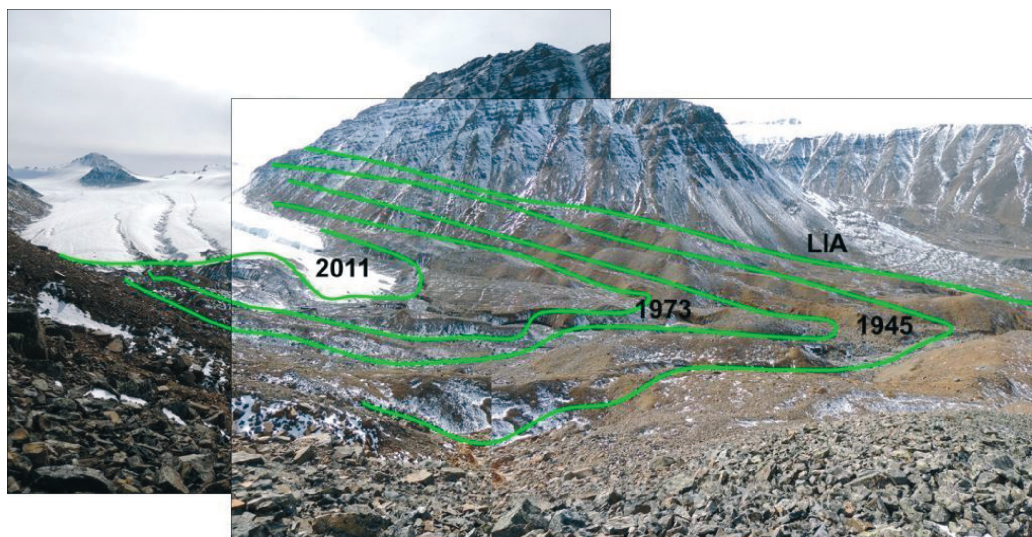
### Введение

Горы Сунтар-Хаята ( $62,5^\circ$  с.ш.,  $140,5^\circ$  в.д.) – второй по величине район современного горного оледенения северо-востока Азии. Он представлен несколькими горными узлами, из которых наиболее исследован Северный массив (г. Мус-Хая, 2959 м над ур. моря). Ещё до открытия здесь оледенения некоторые исследователи отрицали возможность его развития [цит. по 12] на этих высотах. И хотя первые сведения о наличии здесь ледников появились в конце XIX в., планомерное изучение оледенения началось только в конце 1950-х годов в рамках Международного геофизического года 1957–1959. Физико-географическая характеристика и климат хребта хорошо известны из работ М.М. Корейши [11, 12]. Общие сведения об истории открытия и исследовании ледников хребта рассмотрены в работе [14].

Представление о масштабах оледенения хр. Сунтар-Хаята, как и других районов северо-востока Азии, изначально базировалось на результатах стереоскопических аэрофотосъёмок 1943–1970 гг. и созданных на их основе топографических карт масштаба 1:100 000. Силами разных исследователей на базе этих данных создавался и

совершенствовался Каталог ледников СССР [10], однако уже тогда шли дискуссии о числе ледников и общей площади оледенения. Пользуясь разными методами дешифрирования и подсчёта площади, исследователи получали неодинаковые результаты. Так, Л.Л. Берман в 1946 г. [цит. по 12] оценивает площадь оледенения в горах Сунтар-Хаята в  $360 \text{ км}^2$ ; по данным Ю.И. Попова, в 1947 г. [цит. по 12] она составляла  $380 \text{ км}^2$ . В 1948 г. Ю.И. Попов [цит. по 12] пересчитал площадь оледенения и привёл цифру  $160 \text{ км}^2$ . А.П. Васильковский [3] оценил площадь оледенения гор в  $246 \text{ км}^2$ , а М.М. Корейша – в  $206 \text{ км}^2$  [12].

Дальнейшая корректировка числа ледников и площади оледенения выполнялась О.Н. Виноградовым с коллегами в 1970-х годах [5] в рамках специализированных исследований при составлении Каталога ледников СССР, в котором для гор Сунтар-Хаята указана площадь оледенения, равная  $199,4 \text{ км}^2$  [10]. В настоящее время электронный вариант этого Каталога доступен на сайте Института географии РАН. Его адрес: <http://www.webgeo.ru>. Для территории гор Сунтар-Хаята в нём содержится информация о 197 ледниках, общей площадью  $198,4 \text{ км}^2$ .



**Рис. 1.** Ледник № 31 в горах Сунтар-Хаята (август 2012 г.) и установленные его границы для разновременной аэрокосмической съёмки в 2011, 1973 и 1945 г. и для максимальной фазы во время малого ледникового периода  
**Fig. 1.** Glacier № 31 in Suntar-Khayata Mountains (August 2012) and its boundaries based on multi-temporal aerial and satellite imagery in 2011, 1973, 1945, and its maximum boundaries, established for Little Ice Age

В опубликованной в 2009 г. работе М.Д. Ананичевой [1] на период 1943–1947 гг. указывается площадь оледенения гор в 210 км<sup>2</sup>. Приведённые в Каталоге данные неравнозначны и трудно сопоставимы, поскольку отражают характеристики оледенения разных горных систем в разное время, соответствующее периоду покрытия этих территорий аэрофотосъёмкой (1940–1970 гг.). В этот период ледники существенно сокращались, что было зафиксировано и для гор Сунтар-Хаята исследованиями М.М. Корейши [11, 12].

В последнее десятилетие появилось много новых публикаций, касающихся оценки степени сокращения оледенения и прогноза на ближайшее будущее. В 2000 г. японские исследователи при рекогносцировочных полевых работах установили сокращение края ледника № 31 на 200 м по горизонтали и на 20 м по вертикали за период с 1959 по 2001 г. [23]. В 2006 г. на основе исследования космических снимков LANDSAT 2003 г. М.Д. Ананичева с коллегами [2] отмечает, что оледенение гор Сунтар-Хаята на дату съёмки насчитывало 195 ледников, общей площадью 163 км<sup>2</sup>. По сравнению с данными М.М. Корейши это эквивалентно сокращению площади примерно на 20% за период с 1945 по 2003 г. Таким образом, на протяжении 57 лет средняя скорость сокращения составила около 0,37 %/год. При сохранении подобного темпа оледенение должно исчезнуть к 2250 г.

Особенно противоречивые результаты получены на основе моделирования оледенения с использованием климатических моделей ECHAM4 и ECHAM5 [1, 17] путём подстановки в них высоты линии нулевого баланса *ELA*, рассчитываемой как

арифметическое среднее минимальной и максимальной отметок ледника. Согласно наиболее пессимистичному прогнозу, оледенение сократится до 9 км<sup>2</sup> в период 2040–2060 гг., а полностью исчезнет к 2070 г. При более оптимистичном прогнозе для этого же периода площадь оледенения сократится только до 111 км<sup>2</sup>, что в 11 раз (!) больше предыдущей цифры. В 2011 г. опубликован [22] совершенно иной прогноз динамики оледенения Сунтар-Хаята – ледник № 31 через 400 лет сократится только наполовину и лишь через 1000 лет – на 80%. Таким образом, мы видим, что многие оценки степени сокращения оледенения гор Сунтар-Хаята и особенно прогнозы его динамики на ближайшее будущее выглядят взаимоисключающими.

#### Цель и методы настоящей работы

В 2012 г. мы выполнили рекогносцировочные полевые исследования двух ключевых объектов – ледников № 29 и 31 – в районе г. Мус-Хая, в результате чего установлены отступление краёв ледников на 500–700 м относительно их положения во время съёмки 1945 г. (рис. 1), а также сокращение мощности на 50–70 м и скорости течения в транзитной части в 3–5 раз по сравнению с данными М.М. Корейши и съёмкой 1945 г. В настоящей статье, основываясь на результатах полевых наблюдений, маршрутной GPS-съёмки и разновозрастных аэрокосмических материалов, мы попытались определить истинные масштабы и характер сокращения оледенения гор Сунтар-Хаята на основе двух различных подходов, а также цифровой модели рельефа. В процессе работы нам пришлось коснуться некоторых методических

Таблица 1. Результаты расчётов сокращения ледников Центрального массива гор Сунтар-Хаята с 1954 по 2010 г., выполненные с использованием Каталога ледников СССР, съёмки LANDSAT 2010 г. и ASTER GDEM V2

Параметры оледенения	Каталог ледников (1943–1954 гг.)	LANDSAT 2010 г., ASTER GDEM V2	Изменение	
			в абсолютных единицах	%
Число отдельных ледовых тел	83	87	–	
Площадь, км <sup>2</sup>				
минимальная	0,1	0,03	–0,13	–70
максимальная	4,4	4,23	–0,17	–3,86
средняя	1,014	0,709	–0,306	–30,16
общая	84,2	61,64	–22,56	–26,79
ELA, м	2391±108	2398±84	+11±14	–

аспектов оценки наиболее часто используемой характеристики – высоты нулевого баланса (она же *ELA* и фирновая граница в трактовке некоторых исследователей) [1, 17], а также обсудить другие вопросы оценки ряда морфометрических характеристик ледников с использованием цифровых моделей рельефа. Цель последнего – в большей степени методическая.

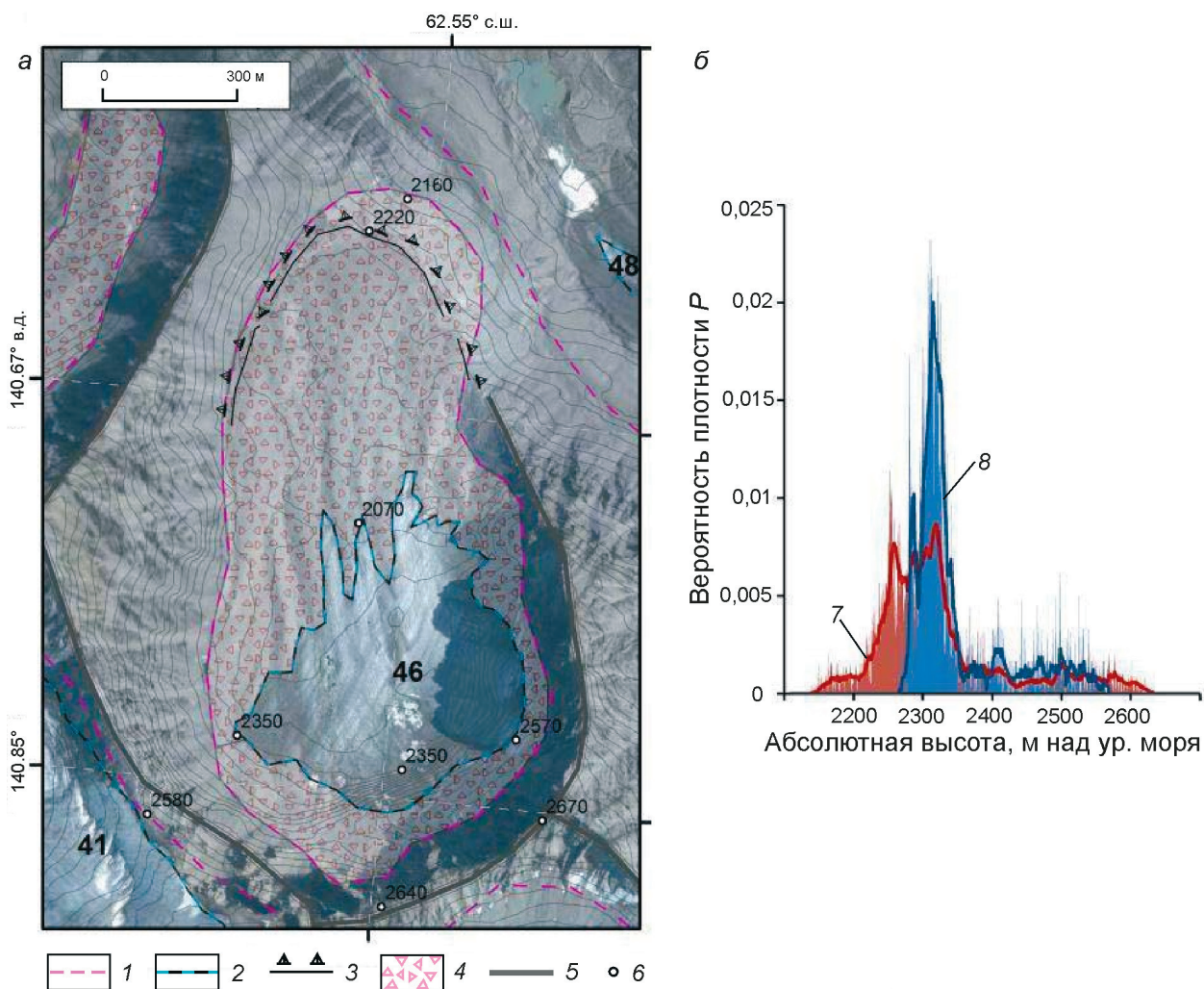
Суть *первого подхода* к оценке заключается в сравнительном анализе основных морфометрических показателей (площадь, *ELA*) ледников, приведённых в Каталоге [10] и рассчитанных на основе космических снимков LANDSAT 2010 г. (разрешение около 15 м) и цифровой модели рельефа ASTER GDEM V2. Отметим, что это – традиционный подход, использованный авторами некоторых уже цитированных здесь работ. *Второй подход* заключался в сравнительном анализе тех же морфометрических показателей выборочных ледников Центрального массива хребта с использованием: 1) космических снимков высокого разрешения (0,5 м) электронного ресурса Bing Maps, полученных на основе съёмки World-view в 2011 г. и свободно распространяемых компанией Microsoft; 2) аэрофотоснимков 1945–1947 гг.; 3) результатов полевых исследований 2012 г. на ледниках № 29 и 31. Второй подход подразумевает тщательное геоморфологическое дешифрирование не только открытой поверхности ледников, но и комплексов морен, абразионных полос, нунатаков и других элементов ледниковой морфоскульптуры.

#### Оценка сокращения оледенения

**Сокращение оледенения Северного массива на основе Каталога ледников и дешифрирования космических снимков LANDSAT 2010 г.** Для оценки сокращения оледенения использованы: спутниковые снимки LANDSAT 2010 г.; данные

Электронного каталога в табличном формате, доступного по адресу <http://www.webgeo.ru>; цифровая модель рельефа ASTER GDEM V2 с разрешением 14–20 м. Дешифрирование изображений выполнялось вручную, все операции по расчёту площадей и размерно-высотных характеристик проводились в системе ArcGIS в проекции Pulkovo 1995-GK-25N. Для подсчёта сокращения площади брали только те ледники, которые имелись в Каталоге и были установлены на снимках LANDSAT 2010 г. Для удобства сравнения слившихся (сложно-порядковых и перевальных) ледников мы выполнили процедуру их разделения на составляющие ледники. В ходе подсчёта на снимках LANDSAT 2010 г. обнаружено 87 ледников, в то время как в Каталоге на этой территории учтено лишь 83. Увеличение числа ледников связано с тем, что некоторые из небольших двухпорядковых ледников при сокращении практически полностью разделились и на снимках LANDSAT 2010 г. дешифрировались нами в виде отдельных образований. При использовании данного подхода в результате низкого разрешения снимков при дешифрировании ледников оконтуривались лишь открытые участки, лишённые абляционной морены.

Полученные результаты (табл. 1) показывают, что площадь ледников Северного массива в 1954 г. составляла около 84,2 км<sup>2</sup>, а в 2010 г. – 61,64 км<sup>2</sup>, что меньше на 22,56 км<sup>2</sup> (26,8%). Наиболее значительно сократились каровые ледники малой площади (рис. 2). Эти оценки сокращения оледенения вполне совпадают с данными более ранних исследований [2], согласно которым в 2003 г. для всех гор Сунтар-Хаята установлено сокращение площади ледников примерно на 20%. Дальнейшее сокращение ледников с 2003 по 2010 г. ещё на 6,8% выглядит вполне приемлемо. Следующая про-



**Рис. 2.** Схема карового ледника № 46 (а) и частотное распределение его высотного поля (б).

Границы ледника: 1 – на аэрофотосъёмки 1945 г., 2 – на основе космической съёмки 2011 г.; морфологические элементы: 3 – бровка фронтального откоса каменного глетчера комплексного типа, 4 – участки поверхности, покрытые чехлом абляционной морены, 5 – гребни цирков; 6 – отметки высот, м; распределение вероятности плотности  $P$  высотного раstra ASTER GDEM V2: 7 – в границах ледника на 1945 г., 8 – в современных границах

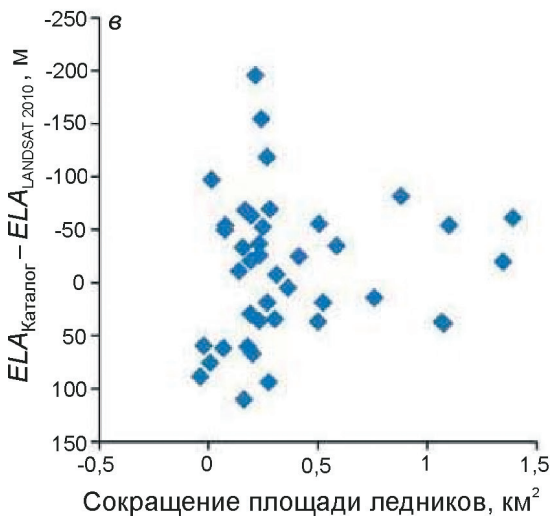
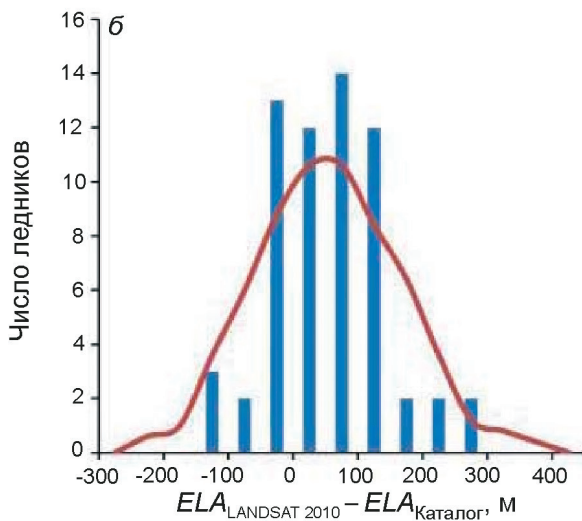
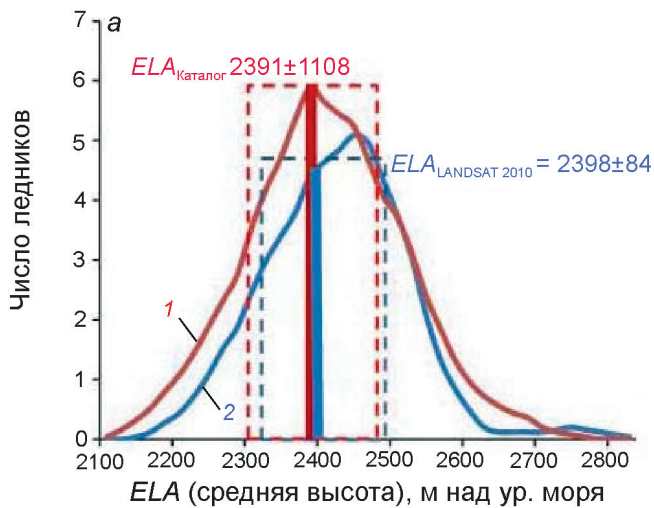
**Fig. 2.** Scheme of cirque glacier № 46 (a) and frequency distribution of its elevation field (b).

Boundaries of the glacier: 1 – on aerial photography in 1945, 2 – based on satellite imagery in 2011; morphological elements: 3 – edge of the frontal slope of the rock glacier (complex type), 4 – areas of the surface covered with ablation moraine, 5 – cirque edges; 6 – elevation points; the plot of probability density  $P$  of the elevation field based on ASTER GDEM V2: 7 – in the glacier's boundaries in 1945, 8 – in the present boundaries

цедура – расчёт нижней высоты границы питания ледников и всей ледниковой системы с помощью метода Гефера [9], использованного М.Д. Ананичевой с коллегами [1, 17, 18]. Этот показатель оценивался на основе выборки из 62 ледников, обнаруженных как на снимках LANDSAT 2010 г., так и представленных в Каталоге. Определение минимальной, максимальной и средней высот для каждого из ледников исследуемой выборки выполнено с использованием ASTER GDEM V2 путём преобразования дешифрованных на

снимках LANDSAT 2010 г. полигонов (ледников) в криволинейные фигуры (поверхности) с соответствующим набором атрибутивных данных (трёхмерных координат).

Полученные результаты отображены на частотных гистограммах распределения  $ELA$  одних и тех же ледников на время каталогизации (до 1954 г.) и на время съёмки LANDSAT 2010 г. (рис. 3, а). На рис. 3, б показано частотное распределение приращений  $\Delta ELA = ELA_{LANDSAT2010} - ELA_{Каталог}$  за тот же период. Ещё один график (см. рис. 3, в) иллю-



стрирует высокую дисперсию оценок  $\Delta ELA$  и отсутствие значимой связи с площадью деградации ледников за период от времени каталогизации до

**Рис. 3.** Изменение высоты нижней границы питания ( $ELA$ ) на основе выборки из 62 ледников Северного массива гор Сунтар-Хаята:

$a$  – частотное распределение и доверительные интервалы  $ELA$  на 1950 и 2010 гг.: 1 – данные Каталога ледников; 2 – дешифрирование LANDSAT 2010 г. и ASTER GDEM V2;  $b$  – частотное распределение приращений  $\Delta ELA = ELA_{LANDSAT2010} - ELA_{Каталог}$  за этот же период;  $c$  – зависимость  $\Delta ELA$  от сократившейся площади ледников

**Fig. 3.** The change of the equilibrium line altitude ( $ELA$ ) based on a sample of 62 glaciers of the Northern Massif of Suntar-Khayata Mountains:

$a$  – the frequency distribution and confidence intervals  $ELA$  for 1950 and 2010: 1 – data of digital Glacier's Inventory, 2 – based on LANDSAT 2010 and ASTER GDEM V2;  $b$  – frequency distribution of increments  $\Delta ELA = ELA_{LANDSAT2010} - ELA_{Inventory}$  during the same period;  $c$  – dependence of  $\Delta ELA$  and the reduced glacial area

съёмки LANDSAT 2010 г. Заметим, что на рис. 3,  $a$  оба распределения близки к нормальному, следовательно, мы можем сравнить средние значения  $ELA_{Каталог} = 2391 \pm 108$  м и  $ELA_{LANDSAT2010} = 2398 \pm 84$  м. Изменение  $\Delta ELA$  составляет всего  $10 \pm 14$  м. По сути, мы повторили подход, использованный М.Д. Ананичевой с коллегами [1], и получили практически те же значения  $ELA$ , имеющие очень большие стандартные отклонения и перекрывающиеся доверительными интервалами.

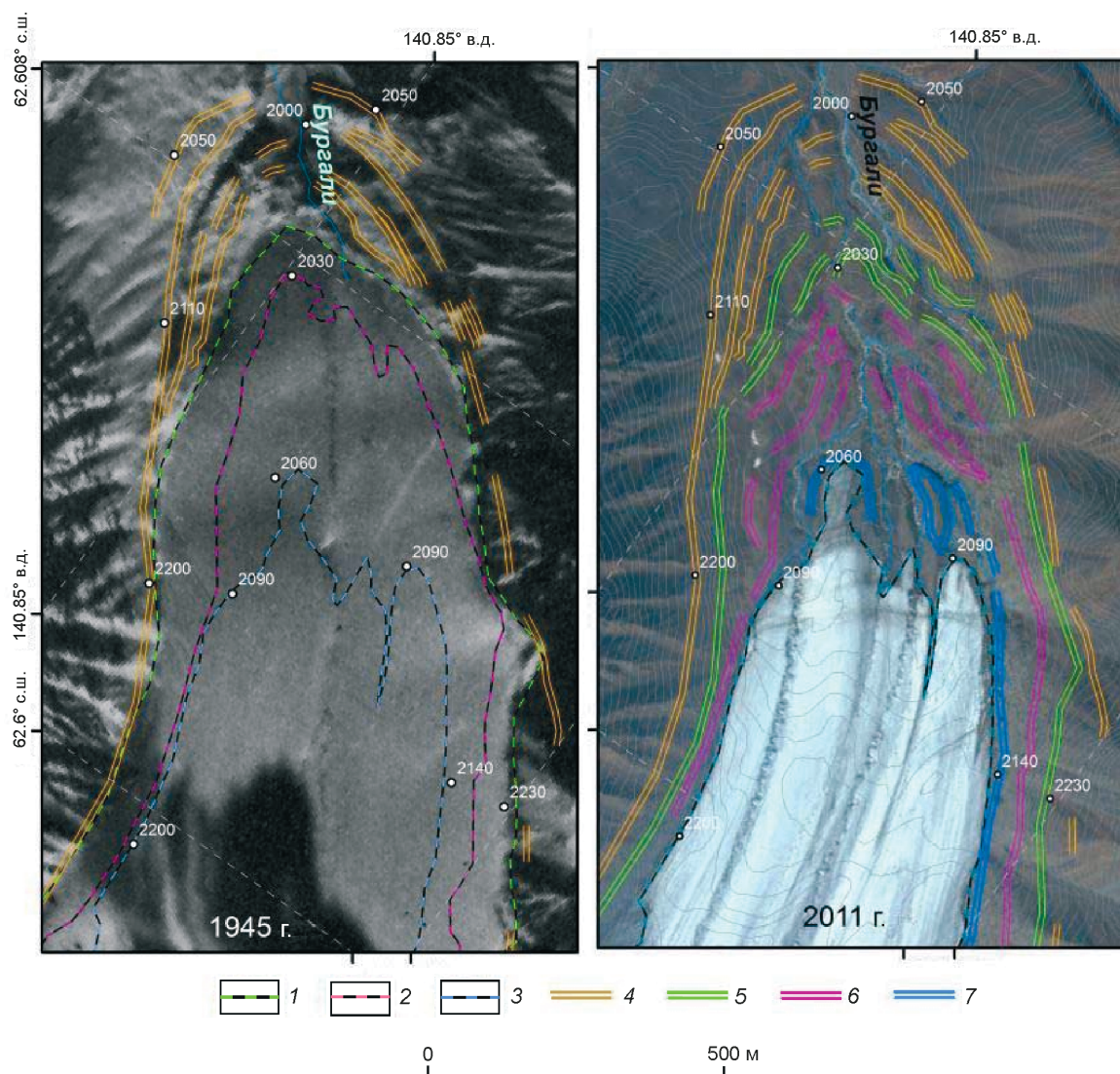
Таким образом, несмотря на значительное сокращение площади ледников исследуемого района, данный метод не показал статистически значимого изменения высоты границы питания. С этим фактом косвенно соглашается и М.Д. Ананичева. Так, в рукописи 2013 г. она пишет, что «высота границы питания ледниковых систем в этом районе (хребет Сунтар-Хаята) существенно не изменилась (изменения не превышают 50 м), несмотря на отступление ледников и уменьшение площади на  $\sim 20\%$ ».

Подводя некоторый итог, необходимо констатировать что, *если ледники интенсивно отступают, а рассчитанная нами для разных лет высота границы питания при этом не меняется, то эта величина либо таковой не является, либо использованные при её расчете методы и/или исходные данные не могут применяться для каких-либо оценок и прогнозов динамики ледников в ближайшем будущем.* К обсуждению данного тезиса мы ещё вернемся, а сейчас рассмотрим результаты оценки сокращения оледенения, полученные на основе другого подхода.

**Сокращение оледенения Северо-Восточного массива г. Мус-Хая на основе аэросъёмки 1945 г., цифровых изображений Bing Maps (Microsoft INC)**

2011 г. и цифровой модели ASTER GDEM V2. Для сбивки и привязки разновременных аэрокосмических материалов, как и в первом подходе, мы использовали проекцию Pulkovo 1995-GK-25N. На имеющихся в нашем распоряжении аэрофото-снимках, к сожалению, отсутствовали основные параметры съёмки, опорные точки и фокусное расстояние. Поэтому мы не смогли воспользоваться программным обеспечением для обработки стереоскопических изображений. Тем не менее,

для решения задачи мы выбрали одиночные снимки с наиболее отчётливыми изображениями исследуемых ледников, которые затем были привязаны к космическому снимку Bing Maps 2011 г. (Microsoft INC) с разрешением 0,5 м путём сплайновой интерполяции. В свою очередь, снимок Bing Maps 2011 г. был скорректирован (перепривязан) к векторной высотной поверхности с вертикальным шагом 10 м, которая была создана путём интерполяции ASTER GDEM V2 (рис. 4).



**Рис. 4.** Схема сокращения (фрагмент ГИС) фронтальной части ледника № 31, начиная с малого ледникового века до 2011 г. (пояснения в тексте).

Границы ледника: 1 – во время аэрофотосъёмки 1945 г., 2 – по снимку LANDSAT 1973 г., 3 – по снимку Bing Maps 2011 г.; возраст краевых морен, реконструированный на основе геоморфологической съёмки 2012 г., лихенометрического датирования и теста остаточной прочности: 4 – малый ледниковый период (X–XIX вв.), 5 – 1945–1973 гг., 6 – 1973–2000 гг., 7 – 2000–2011 гг.

**Fig. 4.** The scheme of the Glacier № 31 terminus reduction (fragment GIS), from the Little Ice Age to 2011 (see explanations in the text). Boundaries of the glacier: 1 – during aerial imagery in 1945, 2 – based on LANDSAT 1973 imagery, 3 – based on Bing Maps 2011 imagery; the terminal moraine ages, reconstructed on the basis of geomorphological survey in 2012, lichenometry dating and Schmidt Hammer Test: 4 – Little Ice Age (X–XIX centuries), 5 – from 1945 to 1973, 6 – from 1973 to 2000, 7 – from 2000 to 2011

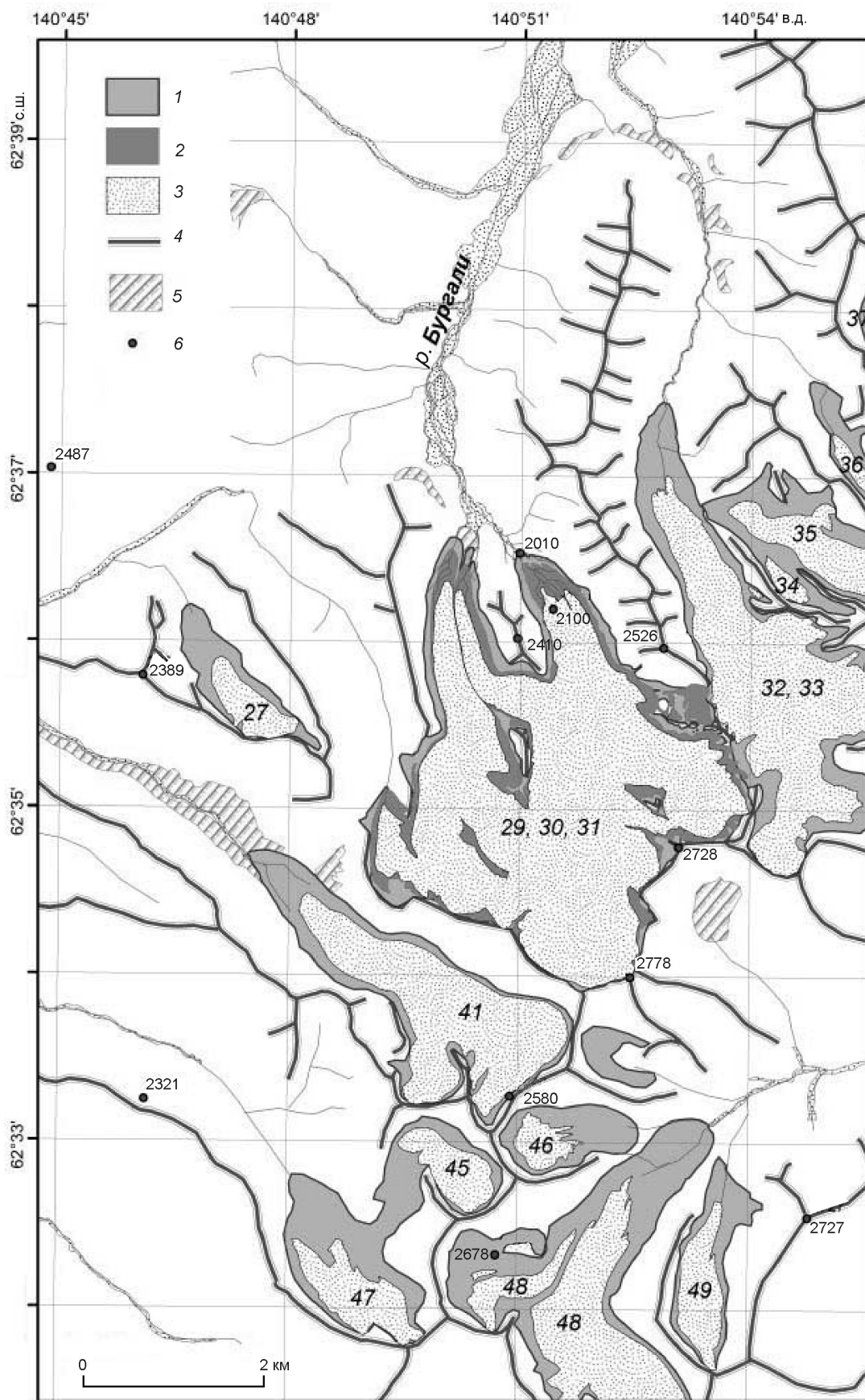
При выборе опорных точек преимущество отдавалось вершинам нунатаков, гребням морен до 1945 г., абразионным полосам и другим гляциогеографическим элементам, отчётливо дешифрируемым как на аэрофотоснимках 1945 г., так и на снимке Bing Maps 2011 г. Всего для привязки каждого ледника использовалось от 100 до 200 точек. Таким же образом к координатной системе Pulkovo 1995-GK-25N перепривязан космический снимок LANDSAT 1973 г. На заключительном шаге картографирования корректировка границ выполнялась только по снимку с наиболее высоким разрешением (Bing Maps 2011 г.). В результате была создана ГИС и на её основе составлена схема сокращения ледников северной части массива г. Мус-Хая (рис. 5). При дешифрировании снимков 2011 г. установлено несколько небольших снежно-фирновых образований, не учтённых в Каталоге М.М. Корейши [11, 12], поэтому при оценке сокращения оледенения эти объекты не учитывались. Обработка результатов, оценка высот и площадей выполнялись способами, описанными ранее. Для оценки морфометрических показателей сокращения оледенения использована выборка из 12 ледовых объектов, выявленных одновременно на снимках 1945 и 2011 гг. Они образованы 18 частично слившимися ледниками. Установлено, что часть ледников в результате сокращения распалась.

При использовании настоящего подхода получены несколько иные показатели сокращения ледников, чем при использовании спутниковых данных LANDSAT 2010 г. и Каталога ледников (табл. 2). Так, общая площадь исследованной группы ледников с 1945 по 2011 г. сократилась на 12,74 км<sup>2</sup> – с 34,6 до 22,16 км<sup>2</sup>, что составляет около 36%. За это время полностью исчез один каровый ледник и несколько ледников распалось. Степень сокращения отдельных ледников варьирует от 17 до 96%, причём скорость сокращения также прямо пропорциональна начальной площади ледников как в абсолютном, так и в относительном выражении (рис. 6). В целом наиболее сильно также сократились небольшие каровые ледники, площадью менее 1,5 км<sup>2</sup>.

Использование цифровой модели рельефа ASTER GDEM V2. позволило оценить также некоторые другие морфометрические показатели сокращения, в том числе изменения минимальной, максимальной, средней и медианной высот ледников, а также *ELA* (см. табл. 2). Гипотети-

ческая линия нулевого баланса вычислена для каждого ледника по методу Гефера как среднее минимальной (край ледника) и максимальной высот ледника (в области питания). По сравнению с результатами предыдущих расчётов получены статистически более достоверные и надёжные оценки *ELA* (см. табл. 2). Так, с 1945 по 2011 г. её величина повысилась на 61±38 м (с 2346±56 до 2407±55 м), при этом средняя высота краевых частей ледников (минимальная высота) увеличилась на 174±118 м (с 2052 до 2226 м), а среднее значение наивысшей отметки в области питания понизилось на 71±81 м (с 2667 до 2595 м над ур. моря). Нижняя высота границы питания ( $ELA_{LANDSAT2010} = 2398 \pm 84$  м), рассчитанная по данным LANDSAT 2010 г. (см. табл. 1) для всего Северного массива, практически идентична  $ELA_{Bing\ Maps\ 2011} = 2407 \pm 55$  м. Последняя определена более точно и имеет меньшее квадратическое отклонение. Заметим, что изменение *ELA*, рассчитанное на основе данных Каталога ледников ( $ELA_{Каталог} = 2391 \pm 108$  м) и LANDSAT 2010 г. ( $ELA_{LANDSAT2010} = 2398 \pm 84$  м), практически не выражено (см. рис. 3). На основе данной оценки никакого изменения высоты границы *ELA* не произошло, хотя это кажется невероятным, поскольку со времени каталогизации до съёмки LANDSAT 2010 г. размеры оледенения существенно сократились.

Кроме *ELA*, оценены также медиана и среднее значение распределения поля высот каждого из ледников исследованной выборки. На основе этих величин проанализированы средние значения исследуемой выборки ледников (см. табл. 2). Данные характеристики вычислены путём анализа частотного распределения высотного раstra. Например, в пределах контура ледников № 29–31 укладывается 20011 пкс высотного раstra ASTER GDEM V2, каждый из которых имеет площадь около 484 м и собственную высоту. Среднее значение высот всех пикселей равно 2418±150 м, а медиана высот имеет значение 2385±60 м. Таким образом, рассчитываемая средняя высота поля высот ледника – нормированная величина, имеющая дисперсию. Заметим, что *ELA*, вычисляемая по методу Гефера, не имеет дисперсии и ошибку её расчёта нельзя оценить. Поверхности ледников имеют разного рода неровности и искривления, поэтому среднее значение, а также медиана и мода распределения поля высот, на наш взгляд, более объективно и полно характеризуют морфометрию площади ледника.



**Рис. 5.** Фрагмент схемы реконструкции сокращения ледников северо-восточной части массива г. Мус-Хая (номенклатура ледников приведена по М.М. Корейше [12]).

Границы ледников: 1 – во время аэрофотосъёмки 1945 г., 2 – по снимку LANDSAT 1973 г., 3 – по снимку Bing Maps 2011 г.; 4 – крупные присклоновые каменные глетчеры лопастного типа; 5 – бровки ледниковых каров и нунатаков; 6 – отметки высот, м

**Fig. 5.** The scheme of the glaciers shrinking of North-Eastern part of the Mus-Khaya Mt. (the nomenclature of glaciers follows by M.M. Koreysha [12]).

Boundaries of glaciers: 1 – during aerial imagery in 1945, 2 – LANDSAT 1973 imagery, 3 – Bing Maps 2011 imagery; 4 – large multi-lob slope-associate rock glaciers; 5 – edges of cirques and nunataks; 6 – elevation marks, m

Таблица 2. Показатели сокращения ледников северо-восточной части массива г. Мус-Хая с 1945 по 2011 г. на основе аэрофотосъёмки 1945 г., космических снимков Bing Maps 2011 г. и ASTER GDEM V2

Морфометрические параметры ледников	Аэрофотоснимки 1945 г.	Bing Maps 2011 г., ASTER GDEM V2	Изменение	
			в абсолютных единицах	%
Число отдельных ледовых тел	12	16	–	
Площадь, км <sup>2</sup> :				
минимальная	0,29	0,01	–0,287	–96,63
максимальная	11,81	9,07	–2,794	–23,23
средняя	3,1±3,39	2,1±2,8	–1,0	–35
общая	34,66	22,16	–12,741	–36,09
<i>ELA</i> по методу Гефера, м	2346±56	2407±55	+61±38	
Высота, м:				
минимальная	2052±102	2226±114	+174±118	–
максимальная	2667±97	2595±115	–71±81	
Среднее частотного распределения высот, м	–	2388±58	–	
Медиана высот, м	–	2385±60	–	

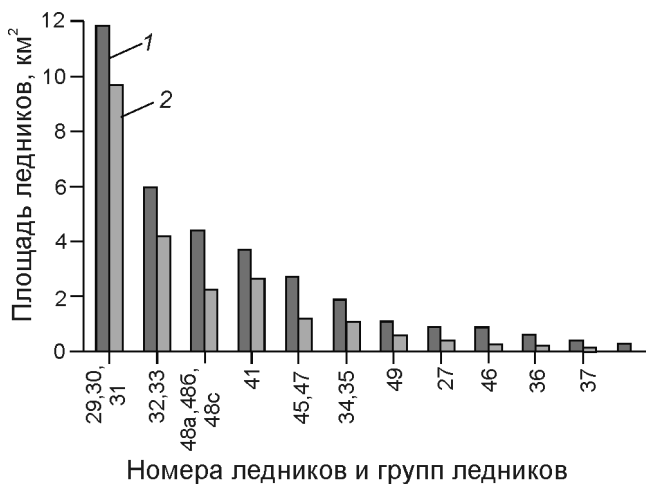


Рис. 6. Площади 18 ледников северо-восточной части массива г. Мус-Хая, оценённые на основе разновременных аэро- и космической съёмки.

Площадь ледников: 1 – на основе аэрофотоснимков 1945 г., 2 – на основе съёмки Bing Maps 2011 г.

Fig. 6. Areas of 18 glaciers of the north-eastern part of the Mus-Khaya Mt. Massif, estimated on the base of multi-temporal aerial and satellite imagery.

Glaciated area: 1 – based on aerial imagery in 1945, 2 – based on Bing Maps 2011 imagery

Отметим, что морфометрические характеристики, рассчитанные на основе частотного распределения высотного поля ASTER GDEM V2, характеризуют современное состояние поверхности ледника, поскольку съёмка ASTER выполнялась в конце 2010 г. Заметим, что все рассчитанные характеристики, а также минимальная

отметка краёв ледников проявляют отчётливую тенденцию повышения с 1945 по 2011 г., что связано с сокращением ледников. Так, средняя высота краевых частей ледников увеличилась на  $174 \pm 118$  м (с  $2052 \pm 102$  до  $2226 \pm 114$  м). Все эти морфометрические характеристики статистически связаны между собой, а также с сокращением площади ледников в период с 1945 по 2011 г. Все исследованные нами ледники имеют экспозицию от северо-западной до северо-восточной. По данным М.М. Корейши [12], для периода 1957–1959 гг. высота снеговой границы, оценённая автором по выборке из 48 ледников, лежала в пределах 2300–2340 м над ур. моря.

На наш взгляд, показательный параметр – изменение среднего значения максимальной высоты ледников, которое за рассматриваемый период снизилось на  $71 \pm 81$  м, что подтверждается результатами дешифрирования снимков с высоким разрешением (см. рис. 2). Отчасти это объясняет недостаточную «реакцию» расчётного значения *ELA* (по методу Гефера) на наблюдаемое значительное сокращение ледников и связано с тем, что редуцируются не только терминальные части ледников в области абляции, но значительно сокращаются площади и в области аккумуляции. Наиболее интенсивная абляция в области питания наблюдается на хорошо освещённых участках, в то время как на затенённых скорость абляции значительно меньше. В первую очередь исчезают маломощные перемётные и висячие на стенках каров ледники. Некогда сливавшиеся

крупные ледники № 29–32 в настоящее время изолированы протяжённым скальным гребнем. В области питания ледников № 29–31 площадь и относительное превышение старых нунатаков значительно увеличились, а также появились и новые образования. На значительной площади у висячих ледников обнажились тыльные стенки цирков ледника, например № 31.

В общем виде процесс сокращения ледников видится следующим образом: ледники как бы погружаются в кары и долины, а значительные участки в области питания освобождаются от снежно-фирновых полей, висячих и перемётных ледников. При наблюдаемом интенсивном сокращении оледенения гор Сунтар-Хаята происходят не только отступление отдельных краёв ледников, но и распад некоторых из них, а также общее изменение морфологии как отдельных ледников, так и всего оледенения.

**Ошибки и возможные погрешности выполненных оценок сокращения ледников.** В 2012 г. в ходе маршрутной съёмки мы выполнили более 1000 измерений в опорных точках, в том числе измерили профили высот вдоль краевых частей ледников № 29 и 31, а также прошли два поперечных профиля в терминальной части ледника № 31 с горизонтальным шагом 40–50 м. На моренных комплексах с таким же шагом выполнены измерения вдоль основных гребней. Кроме того, проведены измерения высот в бортах (на абразионных полосах) этих ледников в транзитных частях. Оценка высоты велась с помощью стандартного GPS-приемника с горизонтальной точностью 3–10 м в системе координат WGS84.

При выборе топографической основы создаваемой ГИС результаты GPS-измерений были вынесены нами на различные картографические основы, в том числе на привязанные в соответствующей системе координат растровые топографические карты масштаба 1:100 000. Оказалось, что местоположения всех GPS-точек наилучшим образом соответствуют геопривязанным снимкам Bing Maps 2011 г. с точностью 3–7 м по плоскости. Весьма удовлетворительно (с точностью 5–10 м) подавляющее большинство GPS-точек соответствовало высотному растру ASTER GDEM V2 и в ещё большей степени – созданной на его основе векторной гипсометрической поверхности по вертикали. Весьма неудовлетворительно наблюдаемые GPS-точки совпадали с элементами имеющихся топографических карт 1947 г. масштаба 1:100 000 не только по вертикали, но и по плоско-

сти. Поэтому мы изначально отказались от применения данных топографических карт в качестве топографической основы для создаваемой ГИС.

Поскольку геопривязанные снимки Bing Maps 2011 г. показали наибольшее пространственное соответствие GPS-съёмке, они использовались в качестве топографической основы. При корректировке (сбивке) Bing Maps 2011 г. и ASTER GDEM V7 использован метод сплайна. Суммарная ошибка горизонтальной интерполяции, равная 20 м, принималась как удовлетворительная. Привязка снимков LANDSAT 2003 г. и аэрофотоснимков 1945 г. выполнена тем же методом и считалась удовлетворительной при суммарной горизонтальной ошибке 50 м. Таким образом, мы полагаем, что суммарная ошибка выполненных оценок составляет по горизонтали около 50 м, а по вертикали – 10–15 м. В пересчёте на площадь ледников это не превышает 5–6%. Кроме того, использование при расчётах выборочных оценок позволяет считать полученные данные удовлетворительными.

#### **Общие особенности деградации ледников**

Наиболее яркие особенности оледенения района – развитие его в пределах мощной низкотемпературной криолитозоны и в континентальном холодном климате. Мощность многолетне-мёрзлых пород здесь достигает нескольких сотен метров. Криоморфогенез активно протекает на всех гипсометрических уровнях рельефа и охватывает разнообразные фации отложений, собственно ледники и сформированные ими морены. Разнообразные криогенные процессы способствуют формированию большого количества грубообломочного материала, его промерзанию, пучению, морозобойному растрескиванию, образованию полигональных льдистых структур и пластовых льдов разной морфологии и мощности. В окружении ледников и на более низких уровнях широко развиты курумо- и наледообразование, мерзлотный крип (криогенная десерпция), солифлюкция, каровые и присклоновые каменные глетчеры.

Среди многочисленных высокольдистых моренных образований и блоков мёртвого льда, образующих в прифронтальной части ледников пояс, шириной от нескольких сотен метров до 1 км, отчётливо выделяются 3–4 разновозрастные генерации (см. рис. 1), разделённые маргинальными каналами. Неравномерное сокращение ледника во времени также хорошо выражено в боковых моренах, сочленяющихся вверх, по долине ледни-

ков, с тримлайнами. Во фронтальной части современного (позднеголоценового) ледникового комплекса, включающего в себя разнообразные блоки мёртвого льда, чётко выражена наиболее мощная (до 100 м) внешняя морена напорно-насыпного типа с высокой (более 50%) льдистостью. Во фронтальной части она сочленяется с валунно-галечно-щербнистым флювиогляциальным конусом, наклонённым вниз по долине на 3–5°.

Современная деградация ледников гор Сунтар-Хаята происходит двумя существенно различающимися способами. Первый реализуется путём смещения боковых каналов стока к оси ледника, что приводит к быстрому формированию новых глубоких термоэрозионных каньонов, отчленяющих с каждым годом всё новые и новые блоки «мёртвого» льда. Эти блоки имеют очень крутые боковые стенки, гребневидные и конусообразные вершины, постепенно тают и покрываются чехлом обломков вытаивающей внутренней морены. Такой способ характерен в основном для крупных ледников со значительным стоком. Смещение дренажных каналов происходит в результате замедления скорости течения ледника и понижения его осевой части из-за сильной абляции.

Второй тип деградации характерен для небольших малоподвижных каровых ледников. Ввиду высокого содержания внутренней морены и незначительного стока их поверхность покрывается бронирующим обломочным чехлом, который затем цементируется конжеляционным льдом. Таяние таких образований существенно замедляется, и в результате формируются специфические монолитные тела сложного гляциально-криогенного генезиса (см. рис. 2), состоящие из льдов метаморфического, инъекционного и конжеляционного происхождения. В отечественной литературе их называют абляционными или комплексными каменными глетчерами [7, 8], в зарубежной – «glacier derived rock glacier» [20, 21].

Кроме льдистых морен, к современному гляциально-криогенному комплексу следует отнести протяжённые присклоновые каменные глетчеры полилопастного типа, мощностью до 80 м и более, которые приурочены к бортам трогов и ледников в бассейне р. Бургали и других долинах. В работах М.М. Корейши [12] эти образования ошибочно идентифицированы как современные коллювиальные террасы. В основном, эти каменные глетчеры расположены в гипсометрическом интервале 2100–1700 м, т.е. лежат ниже пояса современных ледников, и сформировались

в результате деградации последней позднеплейстоценовой фазы оледенения.

Сведения о возрасте краевых морен последнего максимума немногочисленны и носят косвенный характер. М.М. Корейша [12] считает современное оледенение самостоятельной позднеголоценовой стадией, максимум которой имел место от нескольких сотен до первых тысяч лет назад. А.П. Васьковский [4] и М.М. Корейша [12] одновременно указывают на обнаружение стволов лиственницы на отметках 150–200 м выше современной границы леса, сохранившихся с голоценового оптимума (9–5 тыс. л.н.), что свидетельствует о более высоком положении снеговой границы и недавнем смещении высотной поясности. По мнению И.А. Некрасова с коллегами [15], О.Н. Соломиной [16] и М.Д. Ананичевой с коллегами [2], имеющие наиболее «свежий вид» краевые морены ледников хребтов Сунтар-Хаята и Черского связаны с наступанием ледников во время похолоданий малого ледникового периода между XI и началом XX в., причём наиболее холодная фаза отмечалась на рубеже XIX–XX вв. [12, 13]. Характеризуя строение ледников на период 1957–1959 гг., М.М. Корейша [12] отмечал, что внешние морены ледниковых комплексов плотно примыкают к краям большинства ледников и состоят из 1–2 параллельно сжатых гребней. Лишь у некоторых ледников имеется площадка – понижение между фронтальным краем и внешним моренным валом.

В 2012 г. мы предприняли попытку оценить возраст морен бассейна р. Бургали с помощью метода лихенометрии и теста остаточной прочности [19]. Изложение методов и результатов оценки возраста выходит за рамки данной статьи [6]. Заметим лишь, что полученные данные подтвердили высказанные ранее предположения о позднеголоценовом возрасте оледенения. Внешняя краевая морена ледников № 29 и 31 датирована интервалом 700–500 л.н., возраст вложенной в неё морены оказался намного моложе – 100–150 лет.

### Выводы

Выполненные исследования позволили установить значительное сокращение оледенения массива г. Мус-Хая и гор Сунтар-Хаята. На основе полевой съёмки и анализа аэрокосмических снимков с 1945 по 2011 г. установлено сокращение краёв ледников № 29 и 31 соответственно на 450 и 650 м. Интенсивная абляция вызвала уменьшение толщины ледника в транзитной и

краевой частях на 45–50 м. Пробуренная в 1958 г. в средней части ледника № 31 геотермическая скважина, глубиной около 40 м, к настоящему времени полностью вытаяла, а её устье сдвинулось на 150 м вниз по долине. Это соответствует средней скорости смещения 2,5 м/год на протяжении последних 60 лет. По данным М.М. Корейши [11, 12], в 1957–1959 гг. средние скорости движения ледника № 31 составляли не менее 4–5 м/год, а максимальные – 8–9 м/год.

Для оценки масштабов и морфометрических характеристик сокращения оледенения использованы два разных подхода, которые дали разные результаты. Первый подход основан на сравнении данных Каталога и результатов оценки площадей одноимённых ледников на основе космической съёмки LANDSAT 2010 г. и ASTER GDEM V2. Полученная оценка сокращения в пределах Северного массива гор Сунтар-Хаята составила около 23 км<sup>2</sup>, или 27%. На основе указанных данных методом Гефера была рассчитана высота границы питания, оценка которой оказалась ненадёжной, так как имела большое среднеквадратическое отклонение. Более того, полученные данным методом оценки практически не изменились со времени каталогизации ледников, несмотря на значительное их сокращение. Таким образом, данный подход и метод оценки *ELA*, часто используемый некоторыми исследователями, не позволяют надёжно оценивать высоту границы питания и проводить на этой основе прогнозные оценки динамики оледенения в будущем. Смещение в одной выборке объектов разных экспозиций и морфологических типов будет приводить к значительным ошибкам и росту неопределённости. Это особенно актуально для *деградирующих* ледниковых систем, состоящих из ледников преимущественно карового и карово-долинного типов. Именно такие ледники распространены в пределах гор Сунтар-Хаята и характерны для ледниковых систем северо-востока Азии.

Альтернативный способ оценки, основанный на пространственном анализе результатов детального дешифрирования аэрофотоснимков 1945 г. и спутниковых снимков Bing Maps 2011 г. с разрешением около 0,5 м, а также на материалах полевых наблюдений и измерений, позволил более объективно оценить сокращение ледников и изменение высоты нижней границы их питания. На период съёмки 1945 г. края всех исследованных ледников практически упирались в краевые морены максимальной фазы оледенения. Поэтому

оценки, полученные на основе второго подхода, вероятно, характеризуют сокращение оледенения за последние 70–80 лет, которое для исследованной выборки из 16 ледников массива г. Мус-Хая составило около 36%. Второй подход позволил достовернее оценить современное положение границы питания и её повышение, которое составило 61±38 м. Современная высота нижней границы питания оценена по методу Гефера (2407±55 м над ур. моря), а также с помощью выборочных характеристик высотного поля – среднего значения высоты ледника и медианы высот, составляющих 2388±58 и 2385±60 м над ур. моря соответственно. Полученные значения сопоставимы с результатами расчётов высоты границы питания М.М. Корейши для 1957–1958 гг. – 2300–2340 м.

Установлено, что максимальные отметки многих ледников понизились в среднем на 71±81 м. Снижение высоты верхней границы ледников связано с обнажением скальных гребней и нунатаков в области питания и частичной редуцией маломощных висячих и перемётных ледников. Это свидетельствует об изменении морфологии многих ледников в результате их деградации. Установлено два способа деградации ледников: 1) отступление их краевой части путём сегментирования и отчленения абляционной морены термоэрозийными каналами стока; 2) бронирование значительной площади ледника абляционной мореной с последующим её промерзанием и цементацией конжеляционными льдами. В результате второго способа, характерного для каровых ледников, часто формируются образования, сходные с комплексными каменными глетчерами.

**Благодарности.** Авторы благодарят сотрудника лаборатории криогенных ландшафтов Института мерзлотоведения СО РАН П.Я. Константинова и японских коллег из Исследовательского института глобальных изменений (г. Йокосука, Япония) О. Тетсуо и Е. Хироуки за содействие и возможность проведения совместных полевых исследований на массиве г. Мус-Хая в августе 2012 г.

Исследования выполнены при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 11-05-00318-а.

### Литература

1. Ананичева М.Д. Поля гляциологических характеристик для сценария ЕСНАМ-4: Северо-Восточная Сибирь и Камчатка // МГИ. 2009. Вып. 107. С. 81–87.
2. Ананичева М.Д., Капустин Г.А., Корейша М.М. Изменение ледниковых гор Сунтар-Хаята и хр. Черского по

- данным Каталога ледников СССР и космическим снимком 2001–2003 гг. // МГИ. 2006. Вып. 101. С. 163–168.
3. Васильковский А.П. Размеры современного оледенения на Северо-Востоке СССР // Колыма. 1955. № 7. С. 42–45.
  4. Васильковский А.П. Краткий очерк растительности, климата и хронологии четвертичного периода в верховьях рек Колымы и Индигирки и на современном побережье Охотского моря // Ледниковый период на территории Европейской части СССР и Сибири. М.: изд. МГУ, 1959. С. 510–556.
  5. Виноградов О.Н., Голодковская Н.А., Корейша М.М., Серебряный Л.Р. Новые данные о современном и древнем оледенении гор Сунтар-Хаята (по материалам исследований 1970 г.) // МГИ. 1972. Вып. 19. С. 80–91.
  6. Галанин А.А. Лихенометрический метод в изучении современных геоморфологических процессов на Северо-Востоке России: Автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук. Владивосток: ТИГ ДВО РАН, 1997. 22 с.
  7. Галанин А.А. Каменные глетчеры: вопросы терминологии и классификации // Вестн. СВНЦ ДВО РАН. 2010. № 4. С. 2–11.
  8. Галанин А.А., Глушкова О.Ю. Строение и динамика бронированных ледников и каменных глетчеров хребтов Корякский и Искатень в позднем голоцене // МГИ. 2004. Т. 97. С. 161–169.
  9. Калесник С.В. Очерки гляциологии. М.: Географгиз, 1963. 435 с.
  10. Каталог ледников СССР. Т. 19. Ч. 3. Хребет Сунтар-Хаята. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 58 с.
  11. Корейша М.М. Режим современного оледенения хр. Сунтар-Хаята // Исследование ледников и ледниковых районов. Вып. 1. М.: Изд-во АН СССР, 1961. С. 136–153.
  12. Корейша М.М. Современное оледенение хребта Сунтар-Хаята // Результаты исследований по программе Международного геофизического года. Гляциология. № 11. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 170 с.
  13. Ловелиус Н.В. Изменчивость прироста деревьев. Л.: Наука, 1979. 232 с.
  14. Лыткин В.М., Галанин А.А. История открытия и исследования ледников хребта Сунтар-Хаята // Молодой ученый. 2013. № 1. С. 62–68.
  15. Некрасов И.А., Максимов Е.В., Климовский И.В. Последнее оледенение и криолитозона Южного Верхоянья. Якутск: Книжное изд-во, 1973. 151 с.
  16. Соломина О.Н. Горное оледенение Северной Евразии в голоцене. М.: Научный мир, 1999. 262 с.
  17. Ananicheva M.D., Krenke A.N., Barry R.G. The Northeast Asia mountain glaciers in the near future by AOGCM scenarios // The Cryosphere Discuss. 2010. V. 4. № 4. P. 707–735.
  18. Ananicheva M.D., Krenke A.N., Hanna E. Mountain glaciers of NE Asia in the near future: a projection based on climate-glacier systems' interaction // The Cryosphere Discuss. 2008. V. 2. № 1. P. 1–21. www.the-cryosphere-discuss.net.
  19. Galanin A.A., Lytkin V.M., Fedorov A.N., Konstantinov P.Y., Ohata T., Enomoto H., Kadota T. Deglaciation of Suntar-Hayat glaciers for the last 60 years // Cryosphere of Eurasian Mountains: Abstracts of the Intern. Conf. devoted to the opening of the Central Asian Regional Glaciological Center as a Category 2 Center under auspices of UNESCO / Executive Editor I.V. Severskiy. Almaty: Institute of Geography, 2012. P. 18.
  20. Krainer K., Mostler W. Reichenkar Rock Glacier, a glacial derived debris-ice system in the Western Stubai Alps, Austria // Permafrost and Periglacial Processes. 2000. V. 11. P. 267–275.
  21. Krainer K., Mostler W., Span N. A glacier-derived, ice-cored rock glacier in the western Stubai Alps (Austria): Evidence from ice exposures and ground penetrating radar investigation // Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie. 2003. № 38. P. 21–34.
  22. Takahashi S., Sugiura K., Kameda T., Enomoto H., Kononov Yu., Ananicheva M.D., Kapustin G. Response of glaciers in the Suntar-Khayata range, eastern Siberia, to climate change // Annals of Glaciology. 2011. № 52 (58). P. 185–192.
  23. Yamada T., Takahashi S., Shiraiwa T., Fujii Y., Kononov Yu.M., Ananicheva M.D., Koreisha M.M., Muravyev Y.D., Samborsky T.V. Reconnaissance on the № 31 Glacier in the Suntar-Khayata Range, Sakha Republic, Russia // Japanese Society of Snow and Ice. Bulletin of Glaciologic research. 2002. № 19. P. 101–106.

### Summary

This study of glacial-cryogenic complexes of Suntar-Khayata Range is a logical continuation of the research started by M.M. Koreysha in 1957–1959. The studied key site is situated in the upstream of the Burgaly River on the northern slope of Mus-Khaya Mountain (2959 m a.s.l.). It includes glaciers № 29–31 and their ice-cored moraines of different ages. Our study is based on field geomorphologic mapping carried out in 2012, as well as on geospatial analysis of multi-temporal high resolution (1–0.6 m) aerial and satellite imagery. The modern terminus elevation of 16 investigated glaciers varies from 2090 to 2350 m a.s.l. It was found that glaciers' terminal positions have risen on average from 2052±102 to 2226±114 m a.s.l. after 1945 aerial photography. The termini of Glacier № 29 and Glacier № 31 have retreated approximately by 500–650 m, while the ELA has risen by 61±38 m, from 2346±56 to 2407±55 m a.s.l. The total glaciated area has reduced in size by approximately 36%. The surface of Glacier № 31 has lowered by 50–70 m in its terminal part due to ablation. The estimated glacier shrinkage is valid only for the exposed ice area, since the large amount of glacier ice is buried in ablation moraines, glacier-derived rock glaciers and other glacial-cryogenic landforms. Some ice-cored rock glaciers are 30 to 80 m in thickness. A surface ice flow velocity has decreased 5–6 times compared to the 1957–1959 values. A 45-m-deep geothermal borehole drilled in the middle of Glacier № 31 in 1958–1959 has completely melted away and its mouth shifted 150 m down the glacier surface. The drilling equipment of 1958 is now on the top of a steep 70-m-high rock wall which was entirely covered with ice before 1958. This obviously reflects the magnitude of glacier shrinkage.