

УДК 551.324

## Использование лихенометрии и теста остаточной прочности для оценки возраста голоценовых морен в горах Сунтар-Хаята

© 2014 г. А.А. Галанин<sup>1</sup>, В.М. Лыткин<sup>1</sup>, В.А. Шишков<sup>2</sup><sup>1</sup>Институт мерзлотоведения СО РАН имени П.И. Мельникова, Якутск; <sup>2</sup>Институт географии РАН, Москва  
agalanin@gmail.com

### Application of lichenometry and residual strength test for age estimation of Holocene moraines in the Suntar-Khayata Mountains

A.A. Galanin<sup>1</sup>, V.M. Lytkin<sup>1</sup>, B. Shishkov<sup>2</sup><sup>1</sup>Institute of Permafrost, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk;<sup>2</sup>Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow

Статья принята к печати 12 февраля 2014 г.

*Голоценовое оледенение, каменный глетчер, лихенометрия, малый ледниковый период, северо-восток Азии, сокращение ледников, тест остаточной прочности, хребет Сунтар-Хаята, Rhizocarpon geographicum.**Glacier retreat, Holocene glaciation, lichenometry, Little Ice Age, northeastern Asia, Rhizocarpon geographicum, rock glacier, Schmidt Hammer Test, Suntar-Khayata Mountains.*

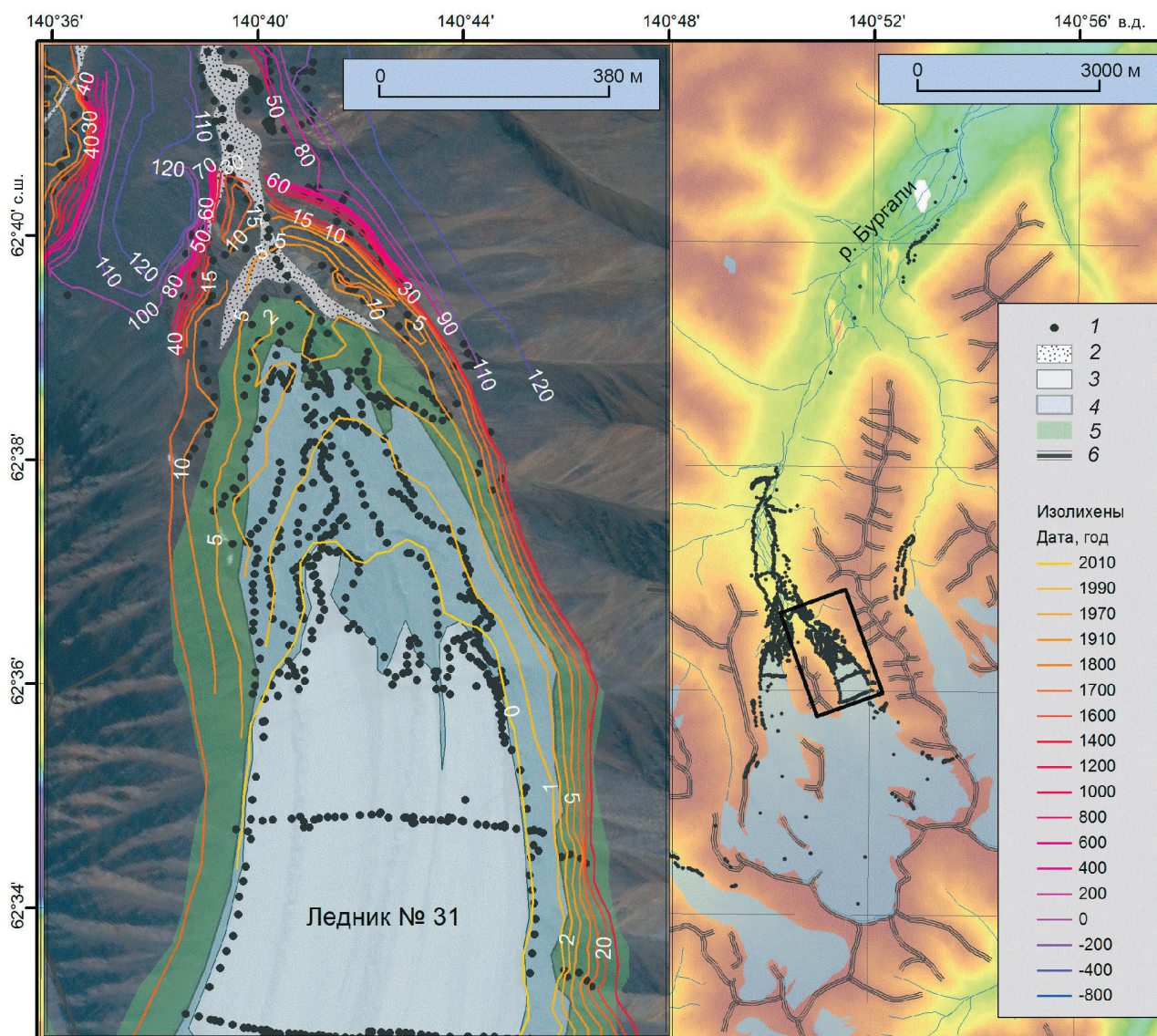
Фактическим материалом настоящей статьи послужили серии измерений остаточной прочности и диаметров лишайника *Rhizocarpon sp.* на различных элементах позднеголоценовой гляциально-криогенной морфоскульптуры во фронтальной части ледников № 29 и 31 в горах Сунтар-Хаята. Всего было заложено 180 лихенометрических площадок (выполнено около 1000 единичных измерений *Rhizocarpon sp.*) и 150 площадок для теста остаточной прочности ШТ, на которых проведено 380 оценок остаточной прочности (5674 единичных измерения). В качестве лихенометрического индекса возраста использована статистика  $RHS$  – среднее значение по пяти максимальным особям на локальной площадке; в качестве индекса остаточной прочности  $Q$  – среднее значение 80–100 единичных измерений на той же площадке. Использование данных разновременной аэрокосмической съёмки позволило вывести зависимость статистики  $RHS$  от времени  $t$  экспонирования морфоскульптур:  $RHS = 0,0535t + 0,29$ . На основе коэффициентов парной регрессии установлены связь между лихенометрическим индексом  $RHS$  и остаточной прочностью  $Q$ , имеющая вид  $RHS = 69209e^{-0,136Q}$ , а также зависимость остаточной прочности от времени экспонирования поверхности  $t = (69209e^{-0,136Q-value} - 0,29)/0,0535$ . На основе выведенных зависимостей оценён возраст пояса морен ледников № 29 и 31. Установлено, что ярко выраженный вал, удалённый от современного края ледников № 29 и 31 на 600–700 м, формировался на протяжении малого ледникового периода. Максимальных размеров ледники достигли во время его первой фазы – похолодания XIII–XV вв. Площадь оледенения превышала современную на 35–40%. Ледники сохраняли практически стационарное состояние вплоть до середины XIX в., а затем стали медленно отступать. К середине XX в. ледники сократились на 5–7%. Наиболее интенсивное сокращение началось во второй половине XX в.

A series of measurements of residual strength and diameters of lichen *Rhizocarpon sp.* was made on different elements of relief in frontal parts of glaciers № 29 and 31 in mountains Suntar-Khayata. Analysis of the data obtained made possible to find out that the glaciers reached their maximal sizes in the first phase of the little ice age, i.e. during cold period of 13–15<sup>th</sup> centuries when area of glacierization exceeded the present-day one by 35–40%. The glaciers were under approximately stationary state up to middle of 19<sup>th</sup> century, after that their slow retreat did start, and by the middle of 20<sup>th</sup> century the glaciers had shrunken by 5–7%. Later on, they shrank much more intensively.

### Введение

Исследуемый район расположен в истоках р. Бургали, берущей начало от ледников № 29 и 31 на северном склоне горы Мус-Хая (2959 м), представляющей собой ядро Северного массива гор Сунтар-Хаята (рис. 1). Геологическое строение, рельеф и основные характеристики современного оледенения района детально рассмотрены в монографии М.М. Корейши [15]. Ледниковые (морены), гравитационно-склоновые и разнообразные фации криолитогенных отложений сложены преимущественно сильнометаморфизованными кремнистыми алевролитами и роговиками, реже – гранитоидами и метасоматитами. Особая прочность и устойчивость к истиранию широко развитых здесь кремнистых пород определила наличие в этом районе большого числа

обработанных ледниками скальных морфоскульптур: коренные выходы днища долины; ригели; отполированные ледником и практически лишённые обломочного чехла борта долины (экзарационные полосы); пропиленные в коренных породах каналы ледникового стока. Анализ разновременных аэрокосмических материалов и полевые исследования 2012 г. в бассейне р. Бургали показали, что края ледников № 29 и 31 отступили на 500–700 м от их положения на снимках 1945 г., а площадь оледенения Северного массива гор Сунтар-Хаята сократилась на 36% (см. рис. 1). Средняя высота нижней границы питания ледников ELA повысилась с 2300–2340 до 2407±55 м над ур. моря [13], т.е. на 60–100 м. Во фронтальной части ледников сформировались полихронные комплексы льдистых морен мощностью до 50–70 м.



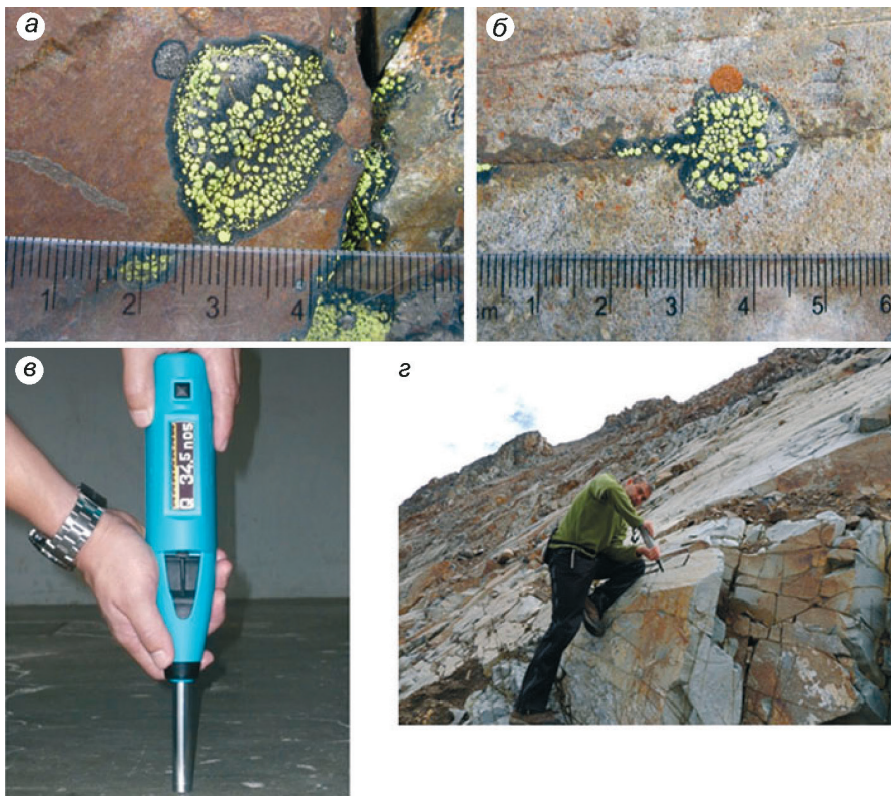
**Рис. 1.** Распределение площадок лишенометрических наблюдений и теста остаточной прочности на голоценовом комплексе морен ледника № 31 (горы Сунтар-Хаята).

1 – площадки лишенометрических наблюдений и теста остаточной прочности; 2 – пойма р. Бургали; 3–5 – площадь ледника № 31 (левая часть рисунка) на основе разновременных аэрокосмических съёмок: 3 – WorldView 2011, 4 – Landsat 1973, 5 – аэро-съёмка 1945 г. Шкала изолихен: значения справа – календарные даты. На рисунке слева белым цветом указаны значения статистики *RHS*. Другие пояснения см. текст

**Fig. 1.** Sites of lichenometry and Schmidt Hammer sampling on Holocene moraine complex of glacier № 31 (Suntar-Khayt Range). 1 – sites of lichenometry and Schmidt Hammer sampling; 2 – flood-plane of Burgaly river; 3–5 – area of glacier № 31 (left part of picture) on time of multi-temporal aircraft and satellite mapping: 3 – World-View 2011, 4 – Landsat 1973, 5 – aircraft 1945. Scale of isolichens: values at the right – Calendar date. Values of the *RHS* – index have pointed with white color on the left picture. See more detail description in text below

Наименее изученными вопросами остаются возраст и размеры ледников Сунтар-Хаята во время неогляциальной эпохи голоцена (4,5–2 тыс. лет назад – л.н.) и малого ледникового периода (МЛП), ярко проявившегося в Северном и Южном полушариях в XIII–XIX вв. [2, 4–8, 10, 14, 16–18, 23, 24, 27 и др.]. В МЛП большинство исследователей выделяют три климатических минимума

(фазы). Первая фаза в XIII–XV вв. была исключительно холодной; вторая фаза, которая приходится на XVI в., характеризовалась потеплением; третья фаза (последняя) длилась с XVII до начала XIX в. и была самой холодной. Последняя фаза МЛП связывается с маундеровским минимумом солнечной активности. Для определения возраста позднего-голоценовых морен горных ледников и их границ



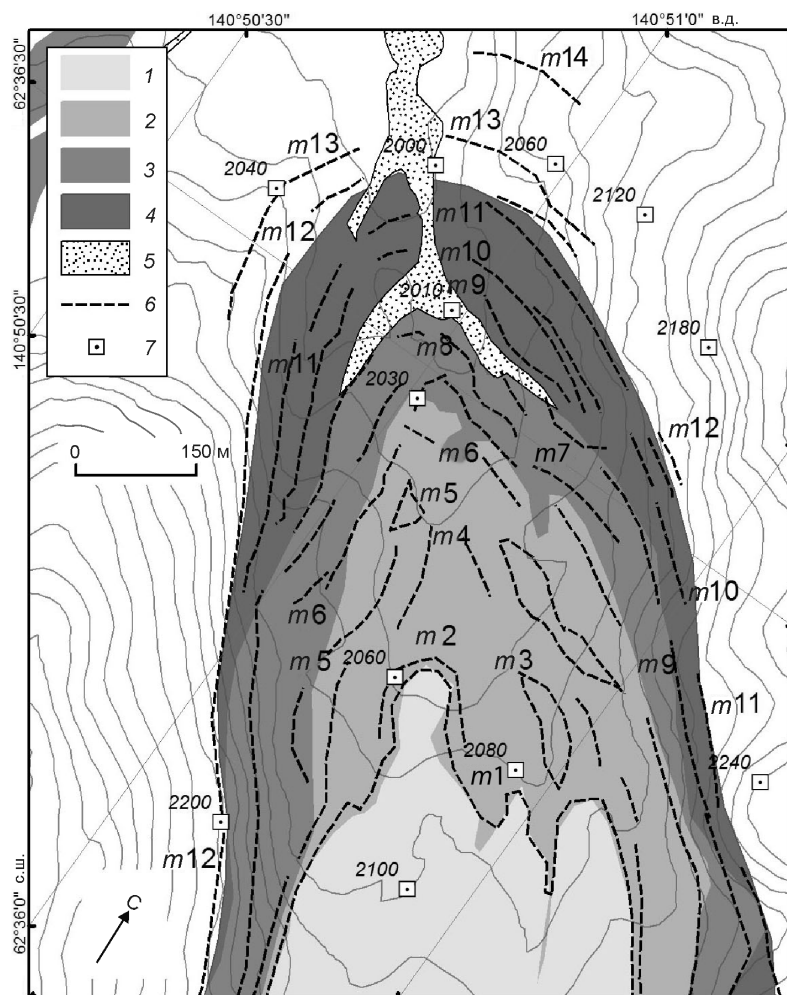
**Рис. 2.** Пример выполнения лишенометрических измерений талломов *Rhizocarpon sp.* (а, б) и теста остаточной прочности (в, г) с помощью цифрового молотка Шмидта  
**Fig. 2.** An example of lichenometry measurements of thallium of *Rhizocarpon sp.* (а, б) and the residual strength test (в, г) with digital Schmidt Hammer

во время МЛП необходимы датировки моренных комплексов. Однако использование радиоуглеродного или дендрохронологического методов в пределах нивально-гляциального и перигляциального поясов на северо-востоке Азии ограничено из-за отсутствия материала для абсолютного датирования, т.е. древесной растительности, и недостаточного развития почвенно-растительного покрова. В то же время данный ледниковый комплекс — хороший полигон для апробации методов относительного и абсолютного датирования на основе методов лишенометрии и теста остаточной прочности — SHT (Schmidt Hammer Test). Данные подходы хорошо известны в современной литературе. Их использовали для оценки хронологии голоценовых ледниковых событий на Скандинавском полуострове, в Новозеландских Альпах, в хр. Черского и других регионах [11, 12, 25, 27, 28].

Обзор методов приведён в специальной литературе [3, 9, 11–13, 19–26, 28]. Особый интерес вызывают разработки В.Б. Була и М.Т. Брендона [19] по использованию так называемого приёма «лишенометрической триангуляции» — заложения сети лишенометрических площадок с последующей интерполяцией оценок в виде линий одинакового возраста — изолихен. Для оценки возраста позднеголоценовых морен чаще всего применяют вы-

борочную статистику — индекс *RH5*, рассчитываемый путём осреднения диаметров пяти наиболее крупных лишайников *Rhizocarpon sp.* (рис. 2, а, б), обнаруженных на исследуемой морфоскульптурной площадке [22, 23, 25, 26]. Использовать молоток Шмидта для оценки возраста голоценовых ледниковых образований предложили Дж.А. Матьюс и Р.А. Шейкесбай [23]. За прошедшие 30 лет данный метод, именуемый в зарубежной литературе Schmidt Hammer Test, стали широко применять для изучения различных типов гляциальной и криогенной морфоскульптуры [21].

Основные принципы работы склерометров мы рассмотрели в работе [12]. В настоящем исследовании мы использовали электронный молоток марки Silver Schmidt Hammer швейцарского производства (см. рис. 2, в, г), имеющий сферическую форму бойка диаметром около 8 мм и диапазон измерений 10–150 МПа. При оценке остаточной прочности, как правило, используют не абсолютные её значения, а относительные, именуемые величиной обратного отскока *R* (rebound value) для склерометров механического типа и обозначаемые буквой *Q* для электронных молотков Шмидта. Значения остаточной прочности *Q* могут варьировать от 10 до 100% и зависеть от абсолютной прочности породы, с которой связаны нелинейными перевод-



**Рис. 3.** Краевой моренный комплекс ледника № 31 и разновозрастные генерации ледниковой морфоскульптуры.

Площадь ледника по данным разновременной аэрокосмической съёмки: 1 – в 2011 г.; 2 – в 1973 г.; 3 – в 1945 г.; 4 – краевой моренный пояс малого ледникового периода (МЛП); 5 – пойма р. Бургали; 6 – разновозрастные генерации ледниковой морфоскульптуры (пояснения см. в тексте); 7 – отметки высот

**Fig. 3.** The distal moraine complex of the glacier № 31 and moraine crests of different age. Area of glacier the base of multi-temporal air-space mapping:

1 – 2011; 2 – 1973; 3 – 1945; 4 – distal moraine belt of the Little Ice Age (LIA); 5 – flood-plane of Burgaly; 6 – different age generations of glacier morphosculpture (see text); 7 – elevation points

ными функциями. На электронных склерометрах точность определения составляет 2–7% и достигается путём 20–30 повторных измерений на каждой однородной площадке. Более детально методика рассмотрена в работах по определению хронологии неогляциальных событий в Южной Норвегии [25], в Южных Альпах Новой Зеландии [27, 28] и др.

### Строение комплекса морен ледников № 29 и 31

Для предварительной хронологической систематизации разновозрастных морфологических элементов мы присвоили им порядковые номера, ориентируясь на их горизонтальную и вертикальную удалённость от современного края ледника. Всего выделено 14 условно разновозрастных генераций (рис. 3). На основе принятых обозначений *m1* – это первая от края ледника морена, *m2* – вторая, *m14* – самая крайняя, расположенная на расстоянии около 2,5 км. У всех ледников гор Сунтар-Хаята на расстоянии 300–700 м от края современных ледников отчётливо выделяется краевой пояс

морен напорно-насыпного типа, который разделяет внутреннюю и внешнюю части голоценового гляциально-криогенного комплекса. Его ширина достигает 80–100 м, иногда в нём выделяют 2–3 сближенных смятых гребня (*m9* – *m11*).

Краевой пояс ограничен глубоко врезанным каналом, углублённым в коренное ложе на 2–3 м. Эта же возрастная генерация морен и окаймляющих их каналов отчётливо прослеживается вверх по бортам долин на высоте 60–70 м, где сопрягается с наиболее высокими отметками свежих экзарационных полос – тримлайнов. В пределах данной возрастной генерации наблюдается колонизация небольших куртин зелёных мхов, изредка встречаются кустарничковые ивы и цветковые растения. Здесь же отмечены начальные стадии преобразования эпигенетическими процессами – появляются пятна морозной сортировки, пучения и морозного растрескивания обломочного материала. Лишайниковый покров неоднороден. На склоне внешнего вала проективное покрытие достигает 5–10%, на

внутренней части – менее 1%. На снимках 1945 г. видно, что морены внешнего пояса ( $m_9$  –  $m_{11}$ ) уже тогда находились за пределами ледников и были отчленены от них маргинальными каналами стока. Следуя предположениям М.М. Корейши [14, 15], в качестве нулевой гипотезы мы полагаем, что краевой вал сформировался в последнюю фазу (XVII–XIX вв.) наступания ледника во время МЛП.

Внутренняя, условно отнесённая к событиям МЛП, и внешняя, более древняя части различаются кардинально. Во внешней части ледниковая морфоскульптура ( $m_{12}$  –  $m_{14}$ ) имеет весьма «дряхлый» геоморфологический облик и в значительной мере затронута эпигенетическими процессами. Ледниковые валуны в результате интенсивного морозного дробления преобразованы во вторичный щебне-глыбовый криогенный элювий, и лишь на некоторых участках сохранились фрагменты обломков и коренных выходов со следами ледниковой обработки. В пределах внешней части широко развиты полигонально-жильные структуры размерами до 5–7 м, курумоподобные образования и активные присклоновые каменные глетчеры мощностью до 40–50 м. Проективное покрытие лишайниками на внешней части достигает 90–100%, наблюдаются сукцессионные замещения накипных лишайников корковыми и листоватыми (*Haematomma ventosum*, *Xanthoria elegans*, *Parmelia sp.* и др.) На морене  $m_{14}$  популяция *Rhizocarpon sp.* находится в угнетённом состоянии, а размеры максимальных особей достигают 180–200 мм. Рельеф внутренней части комплекса (морены  $m_1$ – $m_8$ ) представлен системой разновозрастных гребней, разделённых глубокими термоэрозионными каналами, иногда – внутренними туннелями. Мощность морен достигает 40–60 м, причём большую часть их объёма составляет ледниковый лёд. В отличие от внешней части комплекса, все сингенетические морфоскульптурные элементы сохранились здесь достаточно хорошо, а эпигенетические проявлены слабо.

Морены  $m_7$  и  $m_8$  расположены в пределах границ ледника на период съёмки 1945 г. Здесь наиболее распространены блоки «мёртвого» льда, присыпанные валунно-глыбово-щебнистым чехлом мощностью 0,5–1 м. Поверхностный обломочный материал покрыт тонкой охристой плёнкой, в понижениях обнаружены единичные куртинки зелёных мхов диаметром до 5 см. Лишайниковый покров практически не развит, размеры особей *Rhizocarpon sp.* в среднем не превышают 5 мм. Морены и геоморфологические элементы с номерами

от  $m_1$  до  $m_6$  лежат в области покрытия ледником на снимках 1973 г. Это – наиболее свежие образования, представляющие собой специфический труднопроходимый бэдленд. Материал на поверхности имеет крайне рыхлое сложение, грани обломков лишены охристых плёнок. Мхи и травянисто-кустарничковые растения не обнаружены. Лишайники из рода *Rhizocarpon sp.* встречаются крайне редко и имеют преимущественно точечные размеры.

### Методика полевых работ

Тестовые площадки и их профили закладывались таким образом, чтобы проследить линии простирающихся основных гляциогеоморфологических элементов – гребней морен, маргинальных каналов, абразионных полос. Каждая точка представляет собой участок площадью 500–600 м<sup>2</sup>, расположенный на морфологически и генетически однородной морфоскульптурной поверхности. К таким участкам относятся: валунно-щебнистые морены; обработанные ледником скальные ригели и абразионные уступы в бортах долины; валунно-галечные террасы; осушенные скальные днища маргинальных каналов. Всего было заложено 280 лишенометрических площадок (около 2500 единичных измерений *Rhizocarpon sp.*) и 150 площадок для теста остаточной прочности ШТ, на которых выполнено 380 оценок остаточной прочности (5674 единичных измерений). Результаты первичной обработки выполненных измерений даны в таблице. Дальнейшая обработка заключалась в ранжировании площадок по их геоморфологическому положению на 14 групп, каждая из которых соотносилась с номером соответствующей условно выделенной возрастной категории от  $m_1$  до  $m_{14}$  (см. таблицу). На основе проведённых для каждой лишенометрической площадки оценок *RH5* выполнена ручная интерполяция в изолихенах (см. рис. 1), соединяющих одинаковые значения данного индекса на исследуемой площади. Схема изолихен отражает характер сокращения ледника на протяжении последнего тысячелетия и может быть перекалибрована значениями возрастов на основе приведённого далее уравнения (1).

### Определение зависимости роста статистики *RH5* от относительного возраста морен

Распределение (вариация) использованного лишенометрического индекса *RH5* показывает возрастание данного параметра и, следовательно, относительное удревнение морфоскульптурных элементов в заданном ряду. Это подтверждает на-

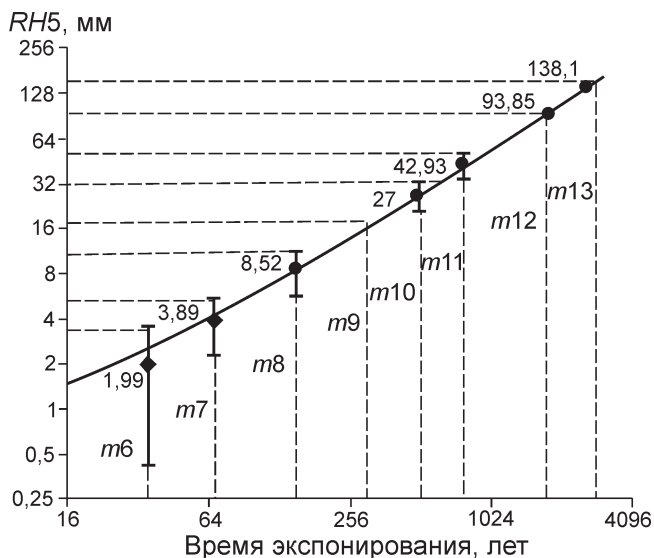
Сводная характеристика показателей SHT и RH5 морен ледников № 29 и 31\*

Номер морены	Число площадок измерений	Среднее значение $Q$ /средняя ошибка оценки $Q$ , %	Число лихенометрических площадок/число измерений на площадках	Среднее значение пяти наиболее крупных талломов RH5, мм	Диаметр талломов, мм, среднее выборочное/среднее геометрическое	Диаметр самого крупного лишайника, мм	Среднеквадратическое отклонение оценки параметра RH5, мм	Минимальное время экспонирования, интэрвал л.н.	Исторические события	
									Сохранение ледников в XX в.	Область покрытия ледником на снимках 1973 г.
$m1$	1/60	74,80/2,98	65							
$m2$	2/140	72,85/3,82	39							
$m3$	3/215	73,05/3,04	38							
$m4$	2/151	72,50/3,59	26							
$m5$	2/153	70,83/4,01	19							
$m6$	3/213	74,36/2,70	21/4	1,68	2,00/1,68	4	1,41			
$m7$	5/365	75,39/2,79	46/43	1,99	1,94/1,61	8	1,57			
$m8$	8/320	73,33/3,62	15/31	3,89	3,51/3,23	10	1,58	66–104		Область покрытия ледником на снимках 1945 г.
$m9$	10/620	67,06/4,39	32/309	8,52	8,01/7,55	12	2,87	108–217		Последняя фаза МЛП (XVIII–XIX вв.)
$m10$	8/587	59,59/5,04	14/237	27,00	20,64/19,65	30	6,20	396–632		Вторая фаза МЛП (XVI–XVII вв.)
$m11$	12/972	60,10/5,33	15/292	42,93	35,37/34,39	110	8,71	652–983		Первая фаза МЛП (XIII–XV вв.)
$m12$	17/1255	44,49/6,07	19/144	93,85	79,99/76,84	140	20,04	1406–2170		Предборальное похолодание (?)
$m13$	3/207	46,11/6,53	3/11	138,1	118,8/114,0	190	37,65	1913–3350		Первая половина голоцена (?)
$m14$	2/41	16,14/3,10	0					> 3800		

\*Общее число площадок измерений значения  $Q$  – 78; общее число измерений значений  $Q$  – 5299; общее число лихенометрических площадок – 352; общее число измерений на площадках – 1071.

чальную гипотезу об увеличении возраста морен в порядке их удаления от современного края ледников. Из таблицы видно, что на моренах  $m1$ – $m5$  ни одной особи *Rhizocarpon sp.* не обнаружено, и это даёт основание объединить все морены в единую возрастную категорию. Первые диагностируемые особи *Rhizocarpon sp.* диаметром менее 2 мм появляются на моренах с номером  $m6$ . Наиболее крупная обнаруженная особь имеет диаметр 4 мм. Значение индекса *RH5* на моренах под номером  $m6$  составляет  $1,68 \pm 1,44$  мм. На морфоскульптурах с номером  $m7$  значение *RH5* =  $1,99 \pm 1,57$ . Максимальные размеры обнаруженной особи – 8 мм. Таким образом, морфоскульптуры  $m6$  и  $m7$  очень близки по возрасту образования, перекрываются доверительными интервалами оценки индекса *RH5*, поэтому они могут быть объединены в единую группу, как и морены  $m1$ – $m5$  с нулевым значением *RH5*.

Морфоскульптурные площадки  $m8$  имеют *RH5* =  $3,89 \pm 1,58$  и достоверно отличаются от  $m6$  и  $m7$ ; они, следовательно, представляют собой автономную возрастную генерацию. Отметим, что, согласно аэрофотоснимку 1945 г., морены  $m8$  находятся в пределах краевой части ледника на дату съёмки. Морены  $m6$  и  $m7$ , имеющие практически одинаковые статистики *RH5*, находятся в пределах поля ледника 1973 г. (39 лет). Следовательно, морены  $m8$  сформировались в интервале между 1945 и 1973 гг. Для оценки предельной (максимальной) начальной скорости роста индекса *RH5* мы использовали соотношения дат аэрокосмической съёмки и средних значений индекса *RH5*. С 1945 по 2012 г. (67 лет) на моренах  $m8$  индекс *RH5* =  $3,89 \pm 1,58$  мм, что соответствует скорости их роста 0,048 мм/год. Примерно тако-



**Рис. 4.** Лихенометрическая оценка минимального времени экспонирования морен ледников № 29 и 31.

Ромбами отмечены морены *m6* и *m7*, возраст которых известен, так как они сформировались между съёмками 1945 и 1973 г. Возраст остальных морен (чёрные кружки) экстраполирован на основе уравнения роста (1). Пояснения см. в тексте

**Fig. 4.** The lichenometry estimation of the minimal time of exposure of glaciers № 31 and 29.

With rhombus moraines *m6* and *m7* are marked whos ages are known due to they formed between airspace mapping of 1945 and 1973. Ages of other moraines (black dots) is extrapolated on the base of growth equation (1). See explanation in text

ва же скорость роста индекса *RH5* при использовании характеристик морен *m7*, сформировавшихся после 1973 г. Она составляет 0,056 мм/год. Среднее значение скорости роста индекса *RH5* для морен *m7* и *m8* – 0,05±0,03 мм/год. Расчёт роста статистики максимального выборочного лишайника даёт средний ежегодный прирост 0,18 мм/год, что близко к значениям скорости роста лишайников данного таксона на ледниковых моренах в других районах мира [3, 9, 22].

На основании имеющихся данных (по аэрокосмическим материалам) о возрасте морен *m7* и *m8* построено уравнение для предельных возрастов данных морен без расчёта скорости ежегодных приростов. Это выполнено проведением линейного тренда в заданных координатах *RH5/t* по двум точкам (точка 1: *t* = 139 лет, *RH5* = 1,99±1,57; точка 2: *t* = 67лет, *RH5* = 3,89±1,58). Построенный тренд приведён на рис. 4. Уравнение имеет следующий вид:

$$RH5 = 0,0535t + 0,29. \quad (1).$$

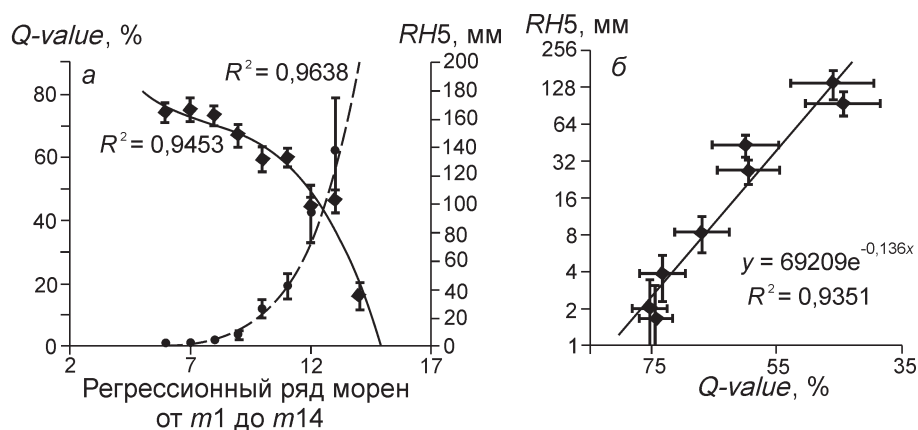
Уравнение связывает время *t* экспонирования поверхности и изменение (рост) выборочной статистики (*RH5*) среднего значения пяти наиболее

крупных особей лишайника *Rhizocarpon sp.*, измеренных на локальной морфоскульптурной площадке. На основании данного уравнения путём вынесения значений *RH5* и стандартных ошибок для морен *m9* – *m11* был экстраполирован их возраст (см. таблицу). Полученные оценки возраста практически не перекрываются доверительными интервалами, поэтому выделенные морены действительно соответствуют реальным детерминированным ледниковым событиям. Морена *m9* датируется интервалом 108–210 л.н., а морены *m10* и *m11* формировались в интервале 396–983 л.н., что, вероятно, соответствует первой фазе малого ледникового периода (XIII–XV вв.). Надёжность оценки среднего значения статистики *RH5* существенно снижается на старых морфоскульптурах. Так, на морене *m13* среднее значение *RH5* = 138,1 мм, а стандартное отклонение – 37,65 мм, что составляет около 30%. Погрешность оценки статистики *RH5* и других выборочных характеристик зависит от многих факторов, некоторые весьма сложно учесть. Основной источник ошибки – омоложение поверхности морфоскульптуры в результате эпигенетического преобразования.

Основываясь на линейном тренде, мы приблизительно оценили минимальное время экспонирования морен *m12* и *m13*, составившее соответственно 1800 и 2600 лет. Как уже отмечалось, эти морены расположены во внешней зоне за пределами краевого моренного пояса, они значительно переработаны криогенными процессами, а лишайниковый покров на этих поверхностях достигает некоторой равновесной динамической стадии, когда их рост на обломочном материале и даже на скальной морфоскульптуре был ограничен процессами криогенного дробления и раскалывания поверхностей и обломков на части. Таким образом, в данном резко континентальном климатическом районе применение лихенометрического метода ограничено интервалом 2–3 тыс. лет, что связано с предельным временем существования самих экспонируемых поверхностей обломков.

### Тест остаточной прочности SHT

Значения величины остаточной прочности (SHT), осреднённые по сериям, приведены в таблице и на рис. 5, а. Полученные результаты показывают приемлемое разрешение метода для относительного возрастного расчленения морен по остаточной прочности слагающего материала их поверхности. Так, наиболее молодые морены *m1*–*m7*, сформировавшиеся за последние 40 лет (после 1973 г.), харак-



**Рис. 5.** Распределение лихенометрического индекса *RH5* и остаточной прочности *Q-value* на разновозрастных моренах ледников № 29 и 31: *а* – обратная экспоненциальная связь статистик *RH5* и *Q-value*; *б* – парная регрессия статистик *RH5* и *Q-value* и интервалы квадратических отклонений **Fig. 5.** The joint distribution of lichenometric value *RH5* and residual strength *Q-value* on the moraines of different age of glaciers № 29 and 31: *a* – the inverse exponential relationship of *RH5* and *Q-value*; *b* – the simple regression of *RH5* and *Q-value* with intervals of standard deviation.

теризуются самыми высокими значениями *Q* – от 85 до 68%. Ледниковая морфоскульптура *m8*, освободившаяся ото льда в период 1945–1973 гг., имеет диапазон остаточной прочности 58–68%.

Внешний комплекс морен (*m11–m13*) ледников № 29 и 31 отличается более выраженной геоморфологической «дряхлостью» и в значительной мере преобразован эпигенетическими криогенными процессами. Остаточная прочность здесь изменяется от 40 до 55%. Совершенно иные значения *Q* – от 29 до 35% – установлены на фрагментах гребня моренного вала, удалённого от современного края ледника на расстояние 2 км вниз по долине р. Бургали. Наиболее низкие значения индекса *Q* = 16,1±3,1% получены для площадки *m14*, расположенной на удалении около 2,5 км от современного края ледника № 31. Частотные распределения *Q-value* на морфоскульптурах *m1–m8* практически имеют близкие модальные значения. Это говорит о том, что прочность обломочного материала за время существования морфоскульптур внутри группы практически одинаково высока. Средние значения оценок *Q* изменяются в данной возрастной группе в интервале 70–75%. Заметим, что на основании лихенометрических данных мы датировали начало формирования комплекса морен *m8* и *m9* последней фазой МЛП – примерно XIX в. Эти морены характеризуются разными значениями остаточной прочности (соответственно 73,3±3,6 и 67,0±4,4%). Действительно, за 100 лет остаточная прочность экспонируемых поверхностей слабо изменилась, а имеющиеся вариации нельзя установить с помощью метода ШНТ.

Наиболее сильные различия остаточной прочности начинают проявляться на моренах *m10–m14*, находящихся во внешней части краевого моренного вала. Так, морены *m10* и *m11* по величине остаточной прочности (соответственно 59,6±5,0

и 60,1±5,3%) могут быть объединены в одну возрастную генерацию, возраст которой на основе индекса *RH5* датируется XI–XV вв. (см. таблицу). В более раннюю возрастную генерацию объединяются площадки с номерами *m12* и *m13* (соответственно 44,5±6,1 и 46,1±6,5%), формирование которых, вероятно, связано с отступанием ледников в первой половине голоцена.

#### Совместный анализ статистик *RH5* и *Q*

Заключительный шаг обработки данных лихенометрии и остаточной прочности – совместный анализ возрастных индексов *RH5* и *Q* на основе построения регрессий средних по площадкам с одноименными порядковыми номерами (см. рис. 5). Для построения уравнения регрессии мы исключили площадки, где индекс *RH5* имеет нулевое значение (т.е. морены *m1–m5*, где лишайники не обнаружены). Полученное уравнение имеет степенной вид

$$RH5 = 69209e^{-0,136Q} \quad (2),$$

и при этом характеризуется высокой достоверностью аппроксимации данных статистики ( $R^2 = 0,9351$ ). Путём преобразования уравнений (1) и (2) можно выразить зависимость остаточной прочности *Q-value* от времени экспонирования поверхности:

$$0,0535t + 0,29 = 69209e^{-0,136Q}.$$

Окончательное уравнение для приближённой оценки возраста морфоскульптур на основе остаточной прочности (статистики *Q-value*) будет следующим:

$$t = (69209e^{-0,136Q-value} - 0,29)/0,0535.$$

Очевидно, что последнее уравнение имеет приближённый вид, поскольку пока мы не имеем хорошо датированных реперных точек для величины *Q* в области её низких значений. Оно пригодно

для выполнения приближённых оценок возраста в пределах диапазона до 3–5 тыс. лет.

### Дискуссия

На протяжении всего периода изучения современного оледенения гор Сунтар-Хаята и других горных сооружений северо-востока Азии наиболее проблематичным аспектом всегда оставался возраст ближайших к ледникам краевых и боковых морен, а также положение и размеры ледников во время последнего максимума [4, 6, 7, 14, 15]. По аналогии с ледниками Европы одни исследователи связывали данные морены с событиями малого ледникового периода. Другие считали современное оледенение реликтом более крупных позднеплейстоценовых оледенений, а моренные комплексы – стадиями его деградации. М.М. Корейша [14] считает оледенение региона самостоятельным событием, максимум которого имел место от нескольких сотен до первых тысяч лет назад. А.П. Васьковский [2] и М.М. Корейша [16] указывают на обнаружение в бассейне р. Бургали (горы Сунтар-Хаята) стволов лиственницы хорошей сохранности на отметках 150–200 м выше современной границы леса и полагают, что она произрастала здесь во время голоценового оптимума 9–5 тыс. л.н. После оптимума произошло похолодание, вызвавшее наступание ледников. Однако возраст самих стволов лиственницы остаётся предположительным, поскольку никаких датировок авторы не приводят.

Позднее И.А. Некрасов с коллегами [16], О.Н. Соломина [17], М.Д. Ананичева и др. [1] сделали заключение, что имеющие наиболее «свежий вид» краевые морены ледников гор Сунтар-Хаята и хр. Черского связаны с наступанием ледников во время похолоданий МЛП, проявившихся между XIII и XIX вв., причём наиболее холодная фаза имела место в XIX в. Авторы основывают свои предположения на допущении о глобальной синхронности колебаний ледников в голоцене во всей Евразии. Полученные на основании приёмов лихенометрии и теста остаточной прочности относительные и абсолютные возрастные характеристики комплекса морен ледников № 29 и 31 в целом согласуются с высказанными ранее предположениями о существовании МЛП в пределах гор Сунтар-Хаята и позволяют более детально реконструировать ледниковые события второй половины голоцена.

Ярко выраженные краевые валы (*m10* и *m11*), отстоящие на расстоянии до 1 км от современных

ледников, и верхние кромки абразионных полос в бортах долин оконтуривают внутренний моренный комплекс, начало формирования которого (*m11*) датировано интервалом 652–983 л.н. Этот интервал хорошо соотносится со временем первого глобального похолодания МЛП, проявившегося в XI–XV вв. Вплотную примыкающий гребень напорной морены (*m10*), датированный интервалом 396–632 л.н., соотносится со второй фазой МЛП, имевшей место в XVI–XVII вв. Размеры ледников во время первой и второй фаз существенно не изменились. Ширина абразионных полос и фрагменты высокольдистых боковых морен позволяют установить мощность ледников, которая достигала в терминальных частях 100–150 м. Площадь оледенения превышала современную на 35–40%. Полученные нами значения остаточной прочности морен МЛП в горах Сунтар-Хаята характеризуются значениями  $Q$ -value  $60,1 \pm 5,3\%$ , что практически идентично моренам МЛП в Южной Норвегии –  $60,0 \pm 1,6\%$  [23, 25, 26]. Третья, более молодая гребневидная морена *m9* вложена и местами надвинута на внешний вал. Время её формирования оценено интервалом 108–217 л.н., что соответствует третьей заключительной фазе МЛП, также имевшей глобальное распространение и наиболее ярко проявившейся в XVIII–XIX вв. Можно предположить, что положение краевых частей ледников на протяжении всего МЛП было относительно стабильным вплоть до середины XIX в., поскольку за этот период сформировался наиболее крупный и компактный пояс краевых и боковых морен, ограниченных глубоким маргинальным каналом, врезанным в коренные склоны и отчётливо прослеживающимся в верхних частях абразионных полос в бортах долины.

Все морены внутренней части комплекса, которые моложе МЛП, характеризуются высокими значениями остаточной прочности – 70–74%. Использованный индекс *RH5* позволил выделить здесь несколько разновозрастных генераций. Морена *m8* расположена сразу за мореной *m9* и формировалась в 1945–1957 гг. За это время ледники отступили не более чем на 100 м, а их площади сократились всего на 5–7% по сравнению с максимумом МЛП. Морены *m1–m7* расположены в области покрытия ледником на снимках 1973 г., т.е. они сформировались на протяжении последних 35–40 лет. Площадь оледенения за этот период, по сравнению с максимумом МЛП, уменьшилась на 35–40%, а края ледников отступили на 600–700 м. За это время мощность ледника в концевой части сократилась примерно на 50 м. Во внешней от кра-

евого пояса части ледниковая морфоскульптура (морены  $m_{12}$ – $m_{14}$ ) имеет совершенно иную, намного худшую степень сохранности сингенетического микрорельефа. Отложения представлены главным образом фацией плащеобразной льдистой донной морены регрессионного типа, краевые валы не выражены. Практически вся ледниковая морфоскульптура интенсивно переработана морозным дроблением и полигонально-жильными структурами. Экспонируемые поверхности морен преимущественно сложены фацией криогенного грубообломочного элювия и отчётливо идентифицируются только в подрезанных рекой обнажениях, где ещё сохраняются ледниковые валуны.

Расположенные во внешней части краевого вала и непосредственно к нему примыкающие морфоскульптуры  $m_{12}$  и  $m_{13}$  имеют минимальный лишенометрический возраст – около 2000 и 3400 лет соответственно. Они характеризуются остаточной прочностью  $44,5 \pm 6,1$  и  $46,1 \pm 6,5\%$ , что близко к средним значениям остаточной прочности морен предбореального похолодания в Южной Норвегии ( $41,6 \pm 1,4\%$ ) [25, 26]. Морфоскульптура  $m_{14}$ , удалённая на 2,5 км от современных краёв ледников, представляет собой фрагмент высокольдистой донной морены с выходами абрадируемых коренных выступов. Индекс остаточной прочности ( $Q$ -value) принимает здесь крайне низкие значения – 20–30%. По сравнению с данными Р.А. Шейкесбай с коллегами [25, 26], в ледниковых районах Южной Норвегии такие значения остаточной прочности характерны для морфоскульптуры, датированной ранним дриасом (10–11 тыс. л.н.).

### Выводы

В прифронтальных частях современных и интенсивно деградирующих ледников гор Сунтар-Хаята развиты полихронные комплексы морен и гляциально-криогенных образований протяжённостью от 0,5 до 1 км. Эти комплексы ограничиваются чётко выраженными краевыми валами и глубокими маргинальными каналами. На основе совместного применения методов лишенометрии, теста остаточной прочности и разновременных аэрокосмических снимков построены калибровочные кривые, а также уравнения роста лишенометрического индекса  $RH5$  и изменения остаточной прочности  $Q$ . Установлено несколько позднеголоценовых возрастных генераций морен, соответствующих трём глобальным эпизодам малого ледникового периода, проявившимся в интервалах XIII–XV, XVI–XVII и XVIII–XIX вв. По-

лученные данные позволяют сделать заключение, что на протяжении всего МЛП, вплоть до конца XIX в., размеры оледенения изменялись незначительно. Наиболее интенсивная деградация оледенения началась во второй половине XX в. и продолжается до настоящего времени. Используемые приёмы лишенометрии и теста остаточной прочности в пределах резко континентальной криолитозоны дают удовлетворительные результаты при весьма тщательном заложении датированных площадок. Особенно это актуально для морфоскульптур ранне- и среднеголоценового возраста, где активность эпигенетических криогенных процессов весьма высока и приводит к омоложению экспонируемых поверхностей.

**Благодарности.** Авторы выражают признательность сотрудникам лаборатории криогенных ландшафтов Института мерзлотоведения СО РАН А.Н. Федорову и П.Я. Константинову за содействие при проведении совместного полевого исследования на массиве горы Мус-Хая в августе 2012 г.

Исследования выполнены при частичной поддержке РФФИ № 12-05-98507 и 14-05-00435-а.

### Литература

1. Ананичева М.Д., Капустин Г.А., Корейша М.М. Изменение ледниковых гор Сунтар-Хаята и хр. Черского по данным Каталога ледников СССР и космическим снимкам 2001–2003 гг. // МГИ. 2006. Вып. 101. С. 163–168.
2. 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.
3. Галанин А.А. Лишенометрический 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.
4. Галанин А.А. Каменные глетчеры северо-востока Азии: картографирование и географический анализ // Криосфера Земли. 2009. Т. XIII. № 4. С. 49–61.
5. Галанин А.А. Каменные глетчеры: вопросы терминологии и классификации // Вестн. СВНЦ ДВО РАН. 2010. № 4. С. 2–11.
6. Галанин А.А. Возраст последнего ледникового максимума на северо-востоке Азии // Криосфера Земли. 2012. Т. XVI. № 3. С. 39–52.
7. Галанин А.А. Каргинский (МИС 3) возраст последнего ледникового максимума на Северо-Востоке Азии // Изв. РАН. Сер. геогр. 2012. № 3. С. 81–93.
8. Галанин А.А. Каменные глетчеры Колымского нагорья // Лёд и Снег. 2012. № 2 (118). С. 106–114.
9. Галанин А.А., Глушкова О.Ю. Лишенометрия // Вестн. Российского фонда фундаментальных исследований. 2003. № 3. С. 22–52.

10. Галанин А.А., Глушкова О.Ю. Строение и динамика бронированных ледников и каменных глетчеров хребтов Корякский и Искатень в позднем голоцене // МГИ. 2004. Вып. 97. С. 161–169.
11. Галанин А.А., Смирнов В.Н. Динамика гравитационных склоновых процессов в горах Северного Приохотья в позднем голоцене, лихенометрическая методика их моделирования и прогноза // Геоморфология. 2004. № 3. С. 67–75.
12. Галанин А.А., Пахомов А.Ю. Опыт применения склерометра «Оникс 2.6.2.» для датирования Мандычанского позднеледникового комплекса (хребет Черского) // Геоморфология. 2010. № 1. С. 16–25.
13. Галанин А.А., Лыткин В.М., Федоров А.Н., Кадома Т. Сокращение ледников гор Сунтар-Хаята и методические аспекты его оценки // Лёд и Снег. 2013. № 4 (124). С. 30–42.
14. Корейша М.М. Режим современного оледенения хр. Сунтар-Хаята // Исследование ледников и ледниковых районов: Вып. 1. М.: изд. АН СССР, 1961. С. 136–153.
15. 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.
16. Некрасов И.А., Максимов Е.В., Климовский И.В. Последнее оледенение и криолитозона Южного Верхоянья. Якутск: Кн. изд-во, 1973. 151 с.
17. Соломина О.Н. Горное оледенение Северной Евразии в голоцене. М.: Научный мир, 1999. 262 с.
18. Соломина О.Н., Савоскул О.С. Ледники западной и северной периферии Тянь-Шаня за 2000 лет // Геоморфология. 1997. № 1. С. 78–86.
19. Bull W.B., Brandon M.T. Lichen dating of earthquake-generated regional rock-fall events, Southern Alps, New Zealand // GSA Bull. 1998. V. 110. № 1. P. 60–84.
20. Calkin P.E., Ellis J.M. A lichenometric dating curve and its application to Holocene glacial studies in the Central Brooks Range, Alaska // Arctic and Alpine Research. 1980. № 12. P. 245–264.
21. Goudie A.S. The Schmidt Hammer in geomorphological research // Progress in Physical Geography. 2006. № 30. P. 703–718.
22. Innes J.L. Lichenometry // Progress in Physical Geography. 1985. V. 9. № 2. P. 187–254.
23. Matthews J.A., Shakesby R.A. The status of the «Little Ice Age» in southern Norway: relative age dating of Neoglacial moraines with Schmidt Hammer and lichenometry // Boreas. 1984. № 13. P. 333–346.
24. Savoskul O.S. Application of lichenometry and tephrochronology in the dating of Holocene glacial deposits in Kamchatka // Journ. of Volcanology and Seismology. 2001. V. 22. № 5. P. 541–558.
25. Shakesby R.A., Matthews J.A., Winkler S. Glacier variations in Breheimen, southern Norway: relative-age dating of Holocene moraine complexes at six high-altitude glaciers // The Holocene. 2004. V. 14. № 6. P. 899–910.
26. Shakesby R.A., Matthews J.A., Owen G. The Schmidt hammer as a relative-age dating tool and its potential for calibrated-age dating in Holocene glaciated environments // Quaternary Science Reviews. 2006. V. 25. Issues 21–22. P. 2846–2867.
27. Winkler S. The «Little Ice Age» maximum in the Southern Alps, New Zealand: preliminary results at Mueller Glacier // The Holocene. 2000. V. 10. № 5. P. 643–647.
28. Winkler S. The Schmidt hammer as a relative-age dating technique: potential and limitations of its application on Holocene moraines in Mt Cook National Park, Southern Alps, New Zealand // New Zealand Journal of Geology & Geophysics. 2005. V. 48. P. 105–116.

### Summary

Residual strength and diameters of lichen *Rhizocarpon sp.* were measured on different elements of the Late Holocene glacial-cryogenic morphosculpture of frontal parts of glaciers № 29 and 31 in the Suntar-Khayat Range. All in all, 180 lichenometric sites (about 1000 individual measurements of *Rhizocarpon sp.*) and 150 sites for testing the residual strength of rebound value were organized, on which 380 estimations of this parameter (5674 individual measurements) were performed. For lichenometric index of age (minimal time of exposure) we used statistics *RH5* that was a mean value from five maximal individuals on a local site; for index of rebound value *Q* that was a mean value from 80–100 unit measurements on the same site was taken. Using of data obtained at different times by aerospace surveys made it possible to derive the relationship between the *RH5* statistics and time *t* of the morphosculptures exposure:  $RH5 = 0.0535t + 0.29$ . On the basis of regression coefficients of *RH5* and *Q* indexes the equation  $RH5 = 69209e^{-0.136Q}$  had been deduced as well as the equation connecting residual strength (rebound value) *Q* and time *t* of surface exposure:  $t = (69209e^{-0.136Q-value} - 0.29)/0.0535$ . Basing on the equations above, age of the moraine belts of the above glaciers was estimated. The most developed moraine belt, now placed apart from the present-day glacier edges at a distance of 600–700 m, was found to be formed for the whole Little Ice Age. Glaciers reached their maximum volumes during its first phase, i.e. during cold period of 13–15<sup>th</sup> centuries. Area of glacierization exceeded its current size by 35–40%. Glaciers remained at their almost steady state until middle of 19<sup>th</sup> century and then began to retreat slowly. By middle of 20<sup>th</sup> century, glaciers shortened by 5–7%. The most intensive shrinking of these glaciers started in the second half of 20<sup>th</sup> century.