НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ

Криосфера Земли, 2014, т. XVIII, № 2, с. 72–82 http://www.izdatgeo.ru

СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И ЛЕДНИКИ

УДК 551.324

ВОЗРАСТ И РАЗМЕРЫ ПОСЛЕДНЕГО ЛЕДНИКОВОГО МАКСИМУМА ХРЕБТА СУНТАР-ХАЯТА НА ОСНОВЕ ЛИХЕНОМЕТРИИ И ТЕСТА ОСТАТОЧНОЙ ПРОЧНОСТИ

А.А. Галанин, В.М. Лыткин, А.Н. Федоров, Т. Кадота*

Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН,
677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия; agalanin@gmail.com
**Исследовательский институт глобальных изменений, Йокосука, Япония*

Приведены результаты оценки возраста морен и хронологии позднеголоценовых ледниковых событий хребта Сунтар-Хаята на основе использования методов лихенометрии и теста остаточной прочности (Schmidt Hammer Test). Установлено, что ярко выраженный пояс морен, удаленный на 600–700 м от современного края ледников 31 и 29, формировался на протяжении Малого ледникового периода. Максимальных размеров ледники достигли во время глобального похолодания XI–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.

Малый ледниковый период, сокращение ледников, каменные глетчеры, лихенометрия, Ризокарпон географический, тест остаточной прочности, хребет Сунтар-Хаята, голоценовое оледенение, северо-восток Азии

AGE AND EXTENT OF THE LAST GLACIAL MAXIMUM IN THE SUNTAR-KHAYATA RANGE BASED ON LICHENOMETRY AND SCHMIDT HAMMER TEST

A.A. Galanin, V.M. Lytkin, A.N. Fedorov, T. Kadota*

Melnikov Permafrost Institute, SB RAS,
677010, Yakutsk, Merzlotnaya str., 36, Russia; agalanin@gmail.com
**Scientific Institute of Global Change, Yokosuka, Japan*

The age and chronology of Late Holocene moraines and glacial events in the Suntar-Khayata Ridge have been estimated using lichenometry and Schmidt Hammer Test. The study has shown that the distinct outer belt of moraines located 600–700 m beyond the modern termini of Glaciers 31 and 29 was formed during the Little Ice Age. Glaciers attained their maximum extent during the period of global cooling from the 11th to 15th centuries. The glaciation area was 35–40 % larger than today. Glaciers had kept a relatively stable position until the middle of the 19th century, and then began to recede slowly. By the middle of the 20th century they had decreased by 5–7 % in size. The most rapid retreat began in the second half of the 20th century.

Little Ice Age, glacier retreat, rock glaciers, lichenometry, Rhizocarpon geographicum, Schmidt Hammer Test, Suntar-Khayata Range, Holocene glaciation, northeastern Asia

ВВЕДЕНИЕ

Хребет Сунтар Хаята является вторым по величине районом современного горного оледенения Северо-Восточной Азии. По данным М.М. Корейши [*1961, 1963*], площадь оледенения хребта на период аэрофотосъемки 1945–1947 гг. составляла около 200 км^2. Немногочисленные публикации [*Ананичева и др., 2006; Ananicheva et al., 2010*] констатируют значительное сокращение площади оледенения хр. Сунтар-Хаята (на 20–30 %) к настоящему времени. Более детальные исследования, выполненные в 2012 г. в бассейне р. Бургали, показали, что площадь оледенения северного массива хр. Сунтар-Хаята сократилась на 36 %, а средняя высота нижней границы питания ледников повысилась на 60–100 м [*Галанин и др., 2013*]. Во фронтальной части всех ледников присутствуют

© А.А. Галанин, В.М. Лыткин, А.Н. Федоров, Т. Кадота, 2014

полихронные комплексы морен различного типа мощностью до 50–70 м и протяженностью до 1 км, отчетливо выделяются краевые валы, отделяющие более молодые внутренние части комплексов от внешних более древних (рис. 1).

На протяжении всего периода изучения современного оледенения хр. 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 [*Галанин, 2012а–в*]. Многие исследователи по аналогии с ледниками Европы связывали данные морены с событиями Малого ледникового периода (МЛП, XIII–XIX вв.). Другие считали современное оледенение реликтом более крупных позднеплейстоценовых оледенений, а моренные комплексы – стадиями его деградации.

В настоящей работе мы использовали метод лихенометрии и тест остаточной прочности, именуемый в зарубежной литературе Schmidt Hammer Test (тест молотком Шмидта). За прошедшие 30 лет данный метод нашел широкое применение при изучении различных типов гляциальной и криогенной морфоскульптуры [*Goudie, 2006*]. Современные электронно-механические молотки Шмидта имеют встроенные устройства памяти и числовой процессор (рис. 2). Величина относительной прочности (*Q*, %) связана с абсолютной прочностью нелинейными функциями. Точность определения остаточной прочности составляет 2–7 %.

Тест остаточной прочности успешно использован для оценки возраста голоценовых морен горных ледников Норвегии, Южных Альп (Новая Зеландия), в хр. Черского и др. [*Галанин, Пахомов, 2010; Matthews, Shakesby, 1984; Shakesby et al., 2004, 2006; Winkler, 2005*].

Рис. 1. Комплекс позднеголоценовых морен ледника 31, хр. Сунтар-Хаята (август 2012 г.). Фото А.А. Галанина.

Лихенометрический метод и разные варианты его применения также широко освещены в литературе [*Галанин, 1997, 2002, 2012г; Соломина, Савоскул, 1997; Галанин, Глушкова, 2003, 2004; Галанин, Смирнов, 2004; Innes, 1985; Savoskul, 2001*]. Для оценки возраста позднеголоценовых морен наиболее часто используется выборочная статистика RH5, рассчитываемая путем осреднения значения диаметров пяти наиболее крупных лишайников *Rhizocarpon* sp., установленных на исследуемой морфоскульптурной площадке [*Shakeskby et al., 2004, 2006*].

Приведенные в настоящей статье материалы получены в ходе полевых исследований комплексной японско-российской экспедиции в 2012 и 2013 гг.

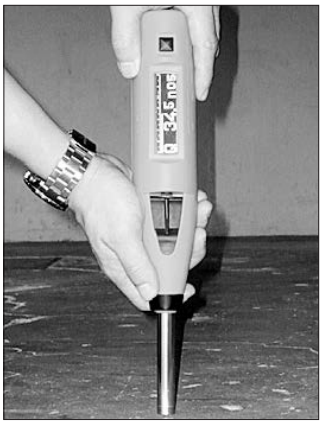

Рис. 2. Цифровой молоток Шмидта марки “Silver Schmidt Hammer” (тип N) и его использование для оценки остаточной прочности гляциально-криогенной морфоскульптуры ледников г. Мус-Хая (лето 2012 г.). Фото А.А. Галанина.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основным объектом исследований являлись гляциально-криогенные комплексы ледников 29 и 31, в пределах которых выделяется мощный краевой пояс морен (см. рис. 1), разделяющий весь комплекс на внешнюю и внутреннюю части. Для предварительной хронологической систематизации исследуемых морфоскульптур мы присвоили им условные порядковые номера, ориентируясь на их горизонтальную и вертикальную удаленность от современного края ледника. Всего было выделено 14 разновозрастных морфоскульптурных генераций (рис. 3, 4). На основе принятых обозначений m1 – первая от края ледника морена, m2 – вторая, m14 – самая крайняя, расположенная на расстоянии около 2,5 км.

У всех ледников хр. Сунтар-Хаята на расстоянии 300–700 м от края современных ледников отчетливо выделяется краевой пояс морен напорно-насыпного типа мощностью до 70 м, в котором иногда выделяются два-три сближенных смятых гребня (m9–m11). Этот пояс разделяет внутреннюю и внешнюю части голоценового гляциально-криогенного комплекса. Краевой пояс ограничен глубоко врезанным каналом, углубленным местами в коренное ложе на 2–3 м. Эта же возрастная генерация морен и окаймляющих их каналов отчетливо прослеживается вверх по бортам долин на высоте 60–70 м, где сопрягается с наиболее высокими отметками свежих экзарационных полос (см. рис. 2).

Внутренняя (m1–m8) и внешняя (m12–m14) части исследуемого гляциально-криогенного комплекса различаются кардинальным образом по морфологии и степени преобразования эпигенетическими процессами, выветрелости обломочного материала, размерам накипных лишайников.

МЕТОДИКА ПОЛЕВЫХ РАБОТ

Лихенометрические измерения и тест остаточной прочности (SHT) выполнялись путем заложения сети точек наблюдений. Каждая точка представляет собой участок площадью 500–600 м^2, расположенный на морфологически и генетически однородной морфоскульптурной поверхности. В качестве индикационного таксона мы использовали таксон *Rhizocarpon* sp., особи которого в полевых условиях могут быть определены до секции *Rhizocarpon* по соломенно-желтому цвету слоевища и другим фитоморфологическим признакам [*Галанин, 2002; Галанин, Глушкова, 2003; Innes, 1985*].

Всего в течение 2012 и 2013 гг. было заложено 180 лихенометрических площадок (около 1000 единичных измерений *Rhizocarpon* sp.) и 150 площадок для теста остаточной прочности (SHT), на которых выполнено 380 оценок остаточной прочности (5674 единичных измерения). Положение основных площадок и осредненные для отдельных морен значения RH5 и *Q* приведены в таблице и на рис. 3, 4.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате первичной статистической обработки были оценены общие статистики для каждой площадки: возрастной индекс RH5 – среднее значение для пяти максимальных особей, среднее арифметическое диаметров всех измеренных талломов, максимальное и минимальное значения, квадратическое отклонение от среднего значения и ошибка определения среднего пяти максимальных особей. Далее все лихенометрические площадки были ранжированы по их геоморфологическому положению на 14 групп, каждая из которых была соотнесена с номером соответствующей условно выделенной возрастной категории от m1 до m14 (см. таблицу).

Возрастание индекса RH5 совместно с порядковыми номерами выделенных генераций от m1 до m14 (см. рис. 3) подтверждает начальную гипотезу об увеличении возраста морен в порядке их удаления от современного края ледников. Из данных рис. 3, *б* и таблицы также видно, что на моренах под номерами m1–m5 ни одной особи *Rhizocarpon* sp. не было обнаружено. Это дает основание объединить все морены в единую возрастную категорию.

Оценка уравнения роста *Rhizocarpon* sp.

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 с номером m6 составляет 1,68 ± 1,44 мм. На морфоскульптурах с номером m7 значение RH5 = 1,99 ± 1,57. Размер максимальной обнаруженной особи 8 мм. Таким образом, морфоскульптуры m6 и m7 – очень близкие по возрасту образования, перекрывающиеся доверительными интервалами RH5, поэтому они могут быть объединены в одну группу, так же как морены m1–m5 с нулевым значением RH5.

Морфоскульптурные площадки m8 имеют RH5 = 3,89 ± 1,58 и достоверно отличаются от m6 и m7, следовательно, они представляют автономную возрастную генерацию. Согласно аэрофотоснимку 1945 г., морены m8 находятся в пределах краевой части ледника на дату съемки. 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 исполь-

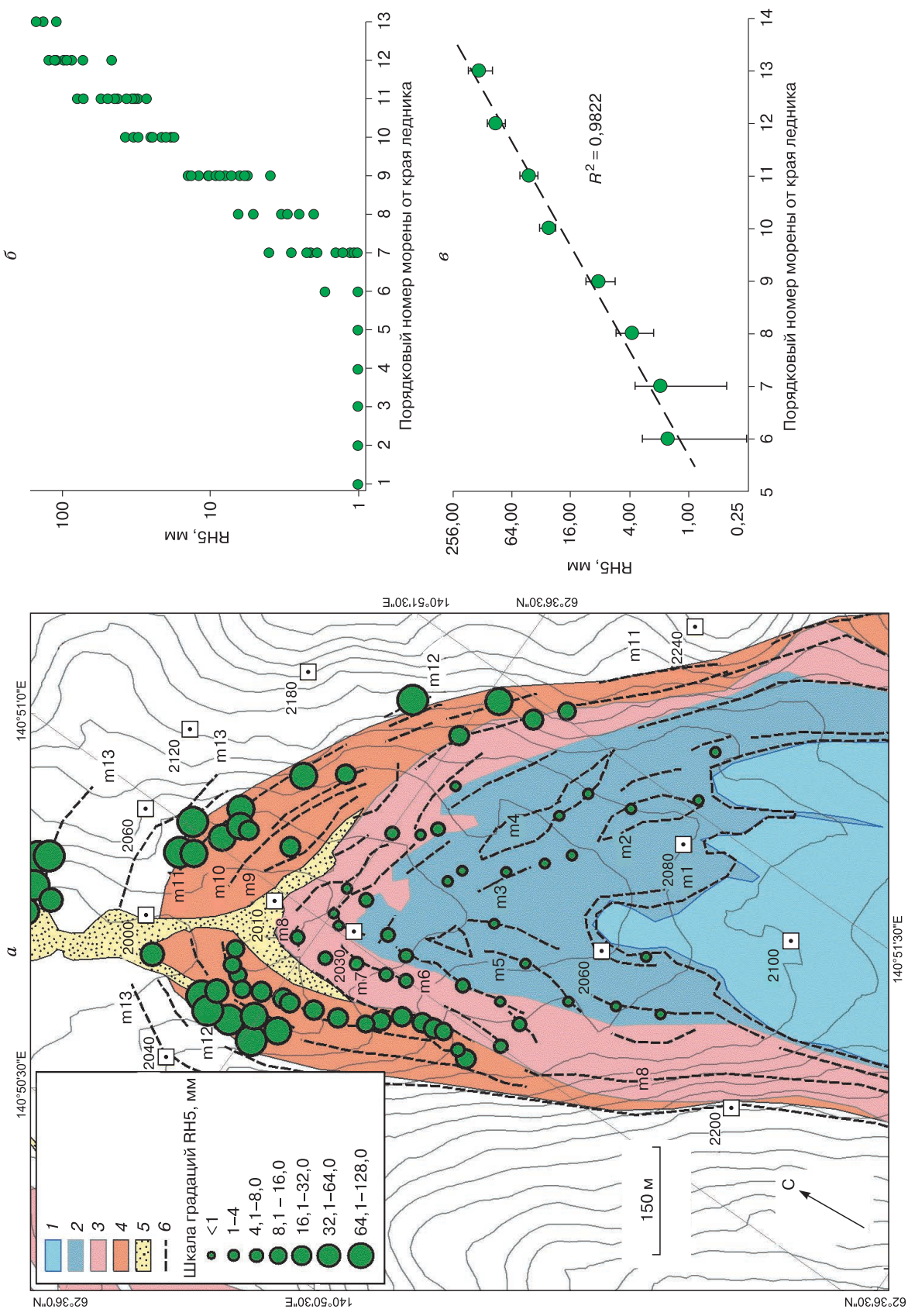

Рис. 3. Фрагмент схемы сокращения ледника 31 (*а*) и распределение лихенометрического индекса RH5 (*б*, *в*) на моренах разного относительного возраста.

а – на шкале диапазоны значений лихенометрического индекса RH5, мм; *б* – зависимость значений RH5 от порядкового номера морены; *в* – среднее значение индекса RH5 для каждого номера морены, R^2 – квадратическое отклонение его оценки; *1* – современный ледник; *2–4* – площадь ледника (*2* – по данным съемки Landsat1973, *3* – по данным аэросъемки 1945 г., *4* – во время Малого ледникового периода); *5* – аллювиальные отложения р. Бургали; *6* – гребни разновозрастных морен и их номера.

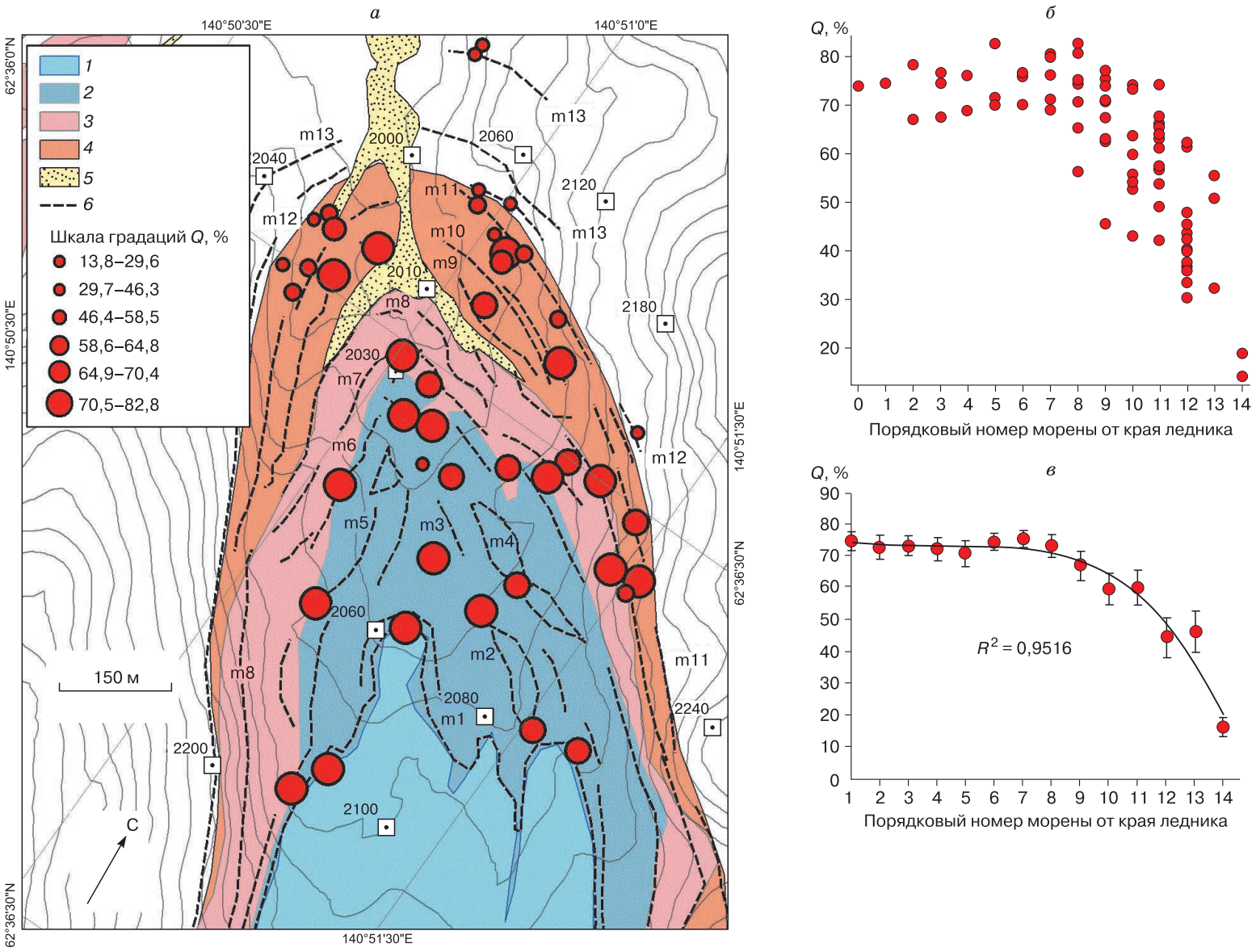

Рис. 4. Фрагмент схемы сокращения ледника 31 (*а*) и распределение величины остаточной прочности *Q* (*б*, *в*) на моренах разного относительного возраста.

а – на шкале диапазоны значений индекса остаточной прочности *Q*, %; *б* – зависимость значений *Q* от порядкового номера морены; *в* – среднее значение индекса *Q* для каждого номера морены, R^2 – квадратическое отклонение его оценки. Остальные усл. обозн. см. рис. 4.

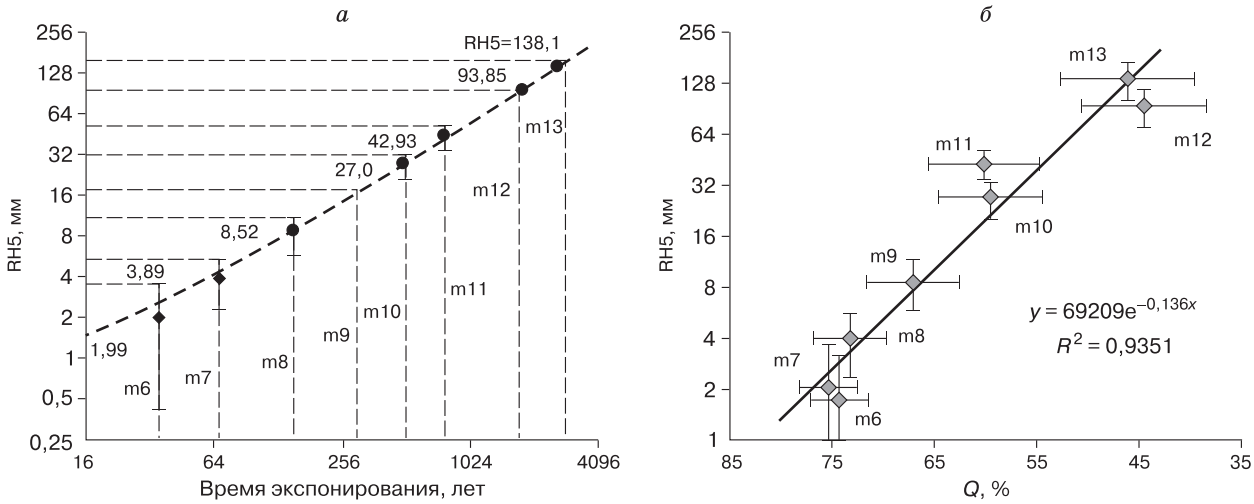

Рис. 5. Зависимость времени экспонирования и индекса RH5 (*а*) и совместное распределение индексов RH5 и *Q* (*б*) на моренах ледников 29, 31.

зовали соотношения дат аэрокосмической съемки и средних значений RH5 соответствующих морфоскульптур. С 1945 по 2012 г. (67 лет) на моренах m8 индекс RH5 = 3,89 ± 1,58 мм, что соответствует скорости ее роста 0,048 мм/год. Примерно такая же скорость роста индекса RH5 у характеристик морен m7, сформировавшихся после 1973 г. Она равна 0,056 мм/год. Среднее значение скорости роста индекса RH5 для морен m7 и m8 составляет 0,05 ± 0,03 мм/год. Расчет роста статистики максимального выборочного лишайника дает средний ежегодный прирост 0,18 мм/год, что близко к скоростям роста лишайников данного таксона на ледниковых моренах в других районах мира [*Галанин, 2002; Галанин, Глушкова, 2003*].

На основе имеющихся данных (по аэрокосмическим материалам) о возрасте морен m7 и m8 построено уравнение для предельных возрастов данных морен без расчета скорости ежегодных приростов. Это выполняется путем проведения линейного тренда (рис. 5, *а*) в заданных координатах (RH5, *t*) по двум точкам (точка 1: t = 39 лет, RH5 = 1,99 ± 1,57; точка 2: t = 67 лет, RH5 = = 3,89 ± 1,58). Уравнение имеет вид

$$\mathrm{RH5} = 0{,}0535t + 0{,}29. \qquad (1)$$

Оно 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. По уравнению (1) путем вынесения значений RH5 и стандартных ошибок для морен m9, m10 и m11 был экстраполирован их возраст (см. таблицу).

Оценка возраста морен

Полученные оценки возраста практически не перекрываются доверительными интервалами, следовательно, выделенные морены соответствуют реальным детерминированным ледниковым событиям. Морены m9 датируются интервалом 210–108 лет назад, а морены m10 и m11 сформировались в интервале 983–396 лет назад, т. е. примерно между XI и XV вв., что соответствует первой фазе МЛП.

Надежность оценки среднего значения статистики RH5 существенно снижается по мере удревнения поверхности. На морене m13 среднее значение RH5 = 138,1 мм, а стандартное отклонение – 37,65 мм, что составляет около 30 %.

Основываясь на линейном тренде, мы приблизительно оценили минимальное время экспонирования морен m12 и m13, составившее 1800 и 2600 лет. Эти морены расположены во внешней зоне ледникового комплекса и значительно переработаны криогенными процессами. Лишайниковый покров здесь достигает некоторой равновесной динамической стадии, когда рост эпилитных лишайников на обломочном материале и даже скальной морфоскульптуре ограничен процессами криогенного дробления и раскалывания поверхностей и обломков на части. Это раскалывание приводит к делению крупных особей на части (т. е. некоторому виду вегетативного размножения) и замедлении роста статистики RH5 и др. Иными словами, в данном резко континентальном климатическом районе применение лихенометрического метода ограничено интервалом 2–3 тыс. лет. Это ограничение связано не с высокими скоростями роста лишайников-индикаторов, а с предельным

Сводная характеристика остаточной прочности (Q) и лихенометрического индекса (RH5) позднеголоценовых морен ледников 29, 31

Параметр	Номер морены														Всего
	m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7	m8	m9	m10	m11	m12	m13	m14	
Количество площадок оценки остаточной прочности (Q), шт.	1	2	3	2	2	3	5	8	10	8	12	17	3	2	78
Количество измерений остаточной прочности (Q), шт.	60	140	215	151	153	213	365	320	620	587	972	1255	207	41	5299
Среднее значение остаточной прочности (Q) по площадкам, %	74,80	72,85	73,05	72,50	70,83	74,36	75,39	73,33	67,06	59,59	60,10	44,49	46,11	16,14	
Ошибка оценки остаточной прочности (Q), %	2,98	3,82	3,04	3,59	4,01	2,70	2,79	3,62	4,39	5,04	5,33	6,07	6,53	3,10	
Количество лихенометрических площадок, шт.	65	39	38	26	19	21	46	15	32	14	15	19	3	0	352
Количество изменений на площадках, шт.	–	–	–	–	–	4	43	31	309	237	292	144	11	*	1071
Среднее значение пяти наиболее крупных талломов (индекс RH5), мм	–	–	–	–	–	1,68	1,99	3,89	8,52	27,00	42,93	93,85	138,10	*	
Среднее выборочное значение диаметров талломов, мм	–	–	–	–	–	2,00	1,94	3,51	8,01	20,64	35,37	79,99	118,80	*	
Среднее геометрическое значение диаметров талломов, мм	–	–	–	–	–	1,68	1,61	3,23	7,55	19,65	34,39	76,84	114,04	*	
Диаметр самого крупного лишайника, мм	–	–	–	–	–	4	8	10	12	30	110	140	190	*	
Ошибка оценки индекса RH5, мм	–	–	–	–	–	1,41	1,57	1,58	2,87	6,20	8,71	20,04	37,65	*	
Минимальное время экспонирования, лет назад	<5	<10	<15	<20	<30	<40	<40	66–104	108–217	396–632	652–983	1406–2170	1913–3350	>3800	
Исторические события	Сокращение ледников в XX в.								Малый ледниковый период			Неогляциальная эпоха			
						По снимкам 1973 г.		По снимкам 1945 г.	3-я фаза (XVIII–XIX вв.)	2-я фаза (XVI–XVII вв.)	1-я фаза (XI–XV вв.)	Пребореальное похолодание (?)		1-я половина голоцена (?)	

Примечание. Прочерк – колонии лишайников на площадках не обнаружены; звездочка – популяция лишайников близка к климаксной стадии, сукцессионные замещения.

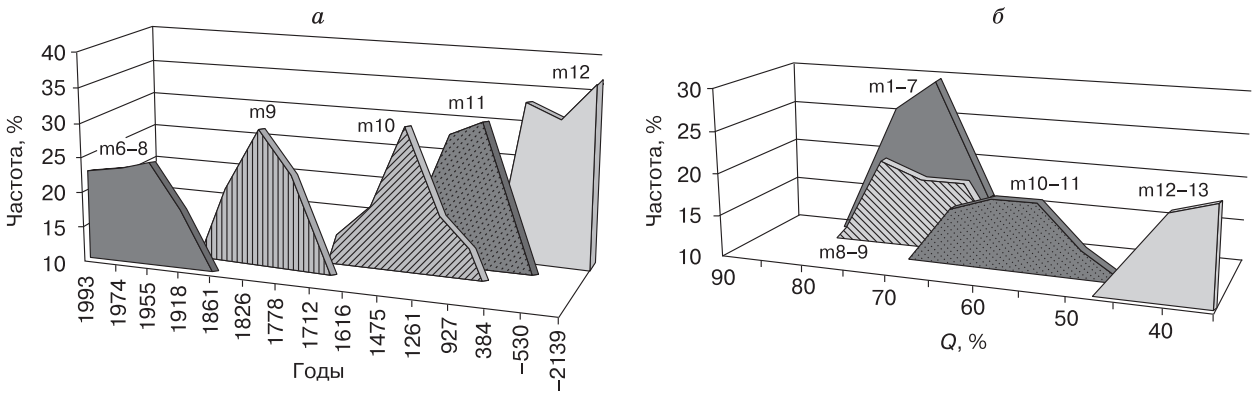

Рис. 6. Частотные распределения лихенометрического индекса RH5 (*а*) и остаточной прочности *Q* (*б*) на разновозрастных моренах и их группах в прифронтальной части ледника 31.

а – шкала размеров талломов (индекса RH5) преобразована в календарные даты на основании уравнения (1).

временем существования самих экспонируемых поверхностей обломков.

Для проверки предположений о наличии в полученной выборке разных совокупностей мы воспользовались стандартным методом построения частотных распределений (рис. 6, *а*). Для этого исходные измерения были разбиты на группы (подвыборки) согласно тем же порядковым номерам морен. Поскольку число элементов разных выборок различное, для возможности сравнения мы преобразовали абсолютные значения (частости) в частоты, выраженные в процентах.

Анализ частотных распределений индекса RH5 подтверждает высказанные гипотезы о неоднородности суммированной выборки и свидетельствует о наличии в ней различных совокупностей, соответствующих нескольким ледниковым событиям. Так, морены m6, m7 и m8 сливаются практически в один класс, что, очевидно, является отражением непрерывного процесса деградации ледников 29 и 31 за последние 60 лет. Морена m9 характеризуется довольно низкой дисперсией (разбросом) индекса RH5 и может рассматриваться как отдельное событие.

Действительно, все лихенометрические площадки с возрастным номером m9 расположены на внутреннем борту первого (внешнего) моренного вала исследуемых ледниковых комплексов. Площадки с номером m10 расположены преимущественно на внешней части вала или в его основании. Площадки m11 лежат в пределах внешнего маргинального канала. Соответствующие этим площадкам частотные распределения (см. рис. 6, *а*) находятся в непосредственной близости. Частотное распределение индекса RH5 на площадках с номерами m12, лежащими за пределами внешнего вала, указывает на более раннее событие, возможно, связанное с похолоданием конца субатлантического периода 4,5–2 тыс. лет назад.

Тест остаточной прочности Schmidt Hammer Test (SHT)

Значения остаточной прочности (SHT), осредненные по сериям, приведены в таблице и на рис. 4. 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.), характеризуются наиболее высокими значениями *Q* – от 85 до 68 %. Ледниковая морфоскульптура m8, освободившаяся ото льда в интервале 1945–1973 гг., характеризуется диапазоном остаточной прочности *Q* от 58 до 68 %.

Внешний комплекс морен (m11–m14) ледников 29 и 31 имеет более выраженную геоморфологическую “дряхлость” и в значительной мере преобразован эпигенетическими криогенными процессами. Остаточная прочность здесь изменяется от 40 до 55 %. Совершенно иные значения $Q = 29–35$ % установлены на фрагментах гребня моренного вала, удаленного от современного края ледника на расстояние 2 км вниз по долине р. Бургали. Наиболее низкие значения индекса $Q = 16{,}1 \pm 3{,}1$ % получены для площадки m14, расположенной на удалении около 2,5 км от современного края ледника 31.

Частотное распределение значений остаточной прочности *Q* также показывает наличие нескольких разновозрастных групп морен, что соответствует разным ледниковым событиям (см. рис. 6, *б*). Распределения значений *Q* на морфоскульптурах от m1 до m8 практически не различаются модальными значениями и варьируют от 70 до 75 %. Это свидетельствует о том, что прочность обломочного материала за время существования данных морфоскульптур одинаково высока и практически не изменилась. Напомним, что на

основе лихенометрических данных мы датировали начало формирования комплекса морен m8–m9 последней фазой МЛП – примерно XIX в. Эти морены характеризуется несколько различными, но все же близкими значениями остаточной прочности (Q = 73,3 ± 3,6 % для m8, Q = 67,0 ± 4,4 % для m9). За 100 лет прочность экспонируемых поверхностей слабо изменилась, а имеющиеся вариации не могут быть достоверно установлены с помощью данного метода.

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 (59,6 ± 5,0 и 60,1 ± 5,3 %), очевидно, 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 (Q = 44,5 ± 6,1 %) и m13 (Q = 46,1 ± 6,5 %), формирование которых, вероятно, связано с отступанием ледников в первой половине голоцена.

Совместный анализ лихенометрического индекса RH5 и остаточной прочности *Q*

Заключительным шагом обработки данных лихенометрии и остаточной прочности был совместный анализ возрастных индексов RH5 и Q на основе построения регрессий средних по площадкам с одноименными порядковыми номерами (см. рис. 5, *б*). Для построения уравнения регрессии были исключены площадки, где индекс RH5 имеет нулевое значение (морены m1–m5, где лишайники не обнаружены). Полученное уравнение имеет степенной вид:

$$\mathrm{RH5} = 69\,209\mathrm{e}^{-0,136Q}, \qquad (2)$$

при этом характеризуется высокой достоверностью аппроксимации данных статистик (R^2 = 0,94).

Путем преобразований уравнений (1) и (2) можно выразить зависимость остаточной прочности Q от времени экспонирования поверхности:

$$0,0535t + 0,29 = 69\,209\mathrm{e}^{-0,136Q}. \qquad (3)$$

Окончательное уравнение для приближенной оценки возраста морфоскульптур на основе остаточной прочности (статистики Q) имеет вид

$$t = (69\,209\mathrm{e}^{-0,136Q} - 0,29)/0,0535. \qquad (4)$$

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Имевшиеся до настоящего времени сведения о возрасте современного оледенения хр. Сунтар-Хаята носили предположительный характер. М.М. Корейша [*1961*] считал его самостоятельным событием, максимум которого имел место от нескольких сотен до первых тысяч лет назад. А.П. Васьковский [*1959*] и М.М. Корейша [*1963*] указывали, что оледенение здесь началось после голоценового оптимума 9–5 тыс. лет назад. И.А. Некрасов с соавт. [*1973*], О.Н. Соломина [*1999*] и М.Д. Ананичева с соавт. [*2006*] заключают, что имеющие наиболее “свежий вид” краевые морены ледников хребтов Сунтар-Хаята и Черского связаны с наступлением ледников во время похолоданий МЛП, проявившихся между XI и XX вв., причем наиболее холодная фаза имела место на рубеже XIX–XX вв. Авторы основывают свои предположения на допущении о глобальной синхронности колебаний ледников в голоцене во всей Евразии.

Полученные в настоящем исследовании относительные и абсолютные возрастные характеристики комплекса морен ледников 29 и 31 в целом согласуются с высказанными ранее предположениями о существовании МЛП в пределах хр. Сунтар-Хаята и позволяют более детально реконструировать ледниковые события второй половины голоцена.

Ярко выраженные краевые валы (m10–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 983–652 лет назад. Этот интервал хорошо соотносится со временем первого глобального похолодания МЛП, проявившегося в XI–XV вв. Вплотную примыкающий гребень напорной морены (m10), датированный интервалом 632–396 лет назад, соотносится со второй фазой МЛП, имевшей место в XVI–XVII вв. Размеры ледников во время между первой и второй фазами существенно не изменились. Ширина абразионных полос и фрагменты высокольдистых боковых морен позволяют установить мощность оледенения, которая достигала в терминальных частях 100–150 м. Площадь оледенения превышала современную на 35–40 %. Полученные нами значения остаточной прочности морен МЛП в хр. Сунтар-Хаята составляют 60,1±5,3 %, что практически идентично значениям для морен МЛП в Южной Норвегии (60,0 ± 1,6 %) [*Shakesby et al., 2004*].

Третья, более молодая гребеневидная морена (m9) вложена и местами надвинута на внешний вал. Время ее формирования оценено интервалом 217–108 лет назад, что соответствует третьей заключительной фазе МЛП, имевшей также глобальное распространение и наиболее ярко проявившейся на протяжении XVIII–XIX вв. Можно предположить, что положение краевых частей ледников в течение 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 отчетливо прослеживающимся в верхних частях абразионных полос в бортах долины. Все последующие генерации морен не оконтуриваются столь врезанными каналами.

Все морены внутренней части комплекса 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 сформировалась в интервале 1945–1957 гг. За это время ледники отступили не более чем на 100 м, а их площади сократились всего на 5–7 % в сравнении с максимумом МЛП. Морены m7–m1 расположены в области покрытия ледником на снимках 1973 г., т. е. они сформировались за последние 35–40 лет. Площадь оледенения за этот период в сравнении с максимумом МЛП уменьшилась на 35–40 %, а края ледников отступили на 600–700 м [*Галанин и др., 2013*]. За это время мощность ледника в терминальной части сократилась примерно на 50 м.

Во внешней от краевого пояса части ледниковая морфоскульптура (морены m12–m14) имеет намного худшую степень сохранности сингенетического микрорельефа. Отложения представлены преимущественно 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 отчетливо идентифицируются только в подрезанных рекой обнажениях, где еще сохраняются ледниковые валуны.

Расположенные во внешней части краевого вала и непосредственно к нему примыкающие морфоскульптуры с номерами m12 и m13 имеют минимальный лихенометрический возраст около 2000 и 3400 лет соответственно. Они характеризуются остаточной прочностью 44,5 ± 6,1 и 46,1 ± 6,5 %, что близко к средним значениям Q для морен предбореального похолодания в Южной Норвегии (41,6 ± 1,4 %) [*Shakesby et al., 2004, 2006*].

Морфоскульптура m14, удаленная на 2,5 км от современных краев ледников, представляет собой фрагмент высокольдистой донной морены с выходами абрадированных коренных выступов. Индекс Q принимает здесь крайне низкие значения (20–30 %). В сравнении с данными Р.А. Шейкесбай с соавт. [*Shakesby et al., 2004, 2006*] в ледниковых районах Южной Норвегии такие значения остаточной прочности характерны для морфоскульптуры, датируемой ранним дриасом (11–10 тыс. лет назад).

Характерной особенностью внешней части гляциально-криогенного комплекса долины р. Бургали является отсутствие выраженных краевых валов и морен насыпного типа. Можно предполагать, что повсеместно распространенные льдистые донные и боковые морены, а также каменные глетчеры являются остатками более крупного горного оледенения [*Галанин, 2012а,в*], краевые части которого были расположены на расстоянии не менее 10 км от краев современных ледников. Это самостоятельное оледенение выделено в Корякском и Чукотском нагорьях, в горах Охотско-Колымского водораздела и названо *искатеньским* (*яляваамским*) [*Галанин, 2012а*]. Его ледниковые морфоскульптурные комплексы включают большое количество морен с погребенными блоками льда и слабо активных присклоновых каменных глетчеров с ледяными ядрами [*Галанин, 2009, 2010*]. Вместе с тем в ледниковых комплексах аллерда и более ранних морены с сингенетическим льдом и каменные глетчеры практически не встречаются. Развитие этого оледенения связано со стремительным подъемом уровня океана и ростом циклонической активности в бассейнах Берингова и Охотского морей на рубеже плейстоцена и голоцена [*Галанин, 2012в*].

ВЫВОДЫ

Впервые в регионе показано, что для оценки относительного и абсолютного возраста позднеголоценовой ледниковой морфоскульптуры могут быть использованы метод лихенометрии и тест остаточной прочности. Из анализа разновременной аэрокосмической съемки установлена зависимость $RH5 = 0{,}0535t + 0{,}29$, где t – минимальное время экспонирования поверхности; RH5 – лихенометрический индекс возраста, рассчитываемый как среднее значение пяти наиболее крупных лишайников *Rhizocarpon* sp., обнаруженных на локальной морфоскульптурной площадке.

С использованием данного уравнения выполнена оценка позднеголоценового комплекса морен ледников 29 и 31. Установлено, что данный комплекс имеет внутреннюю и внешнюю части. Во внутренней части выделяются три основные генерации, формировавшиеся между XI и XIX вв. на протяжении Малого ледникового периода.

Установлена функциональная связь между размерами лишайников (индекс RH5) и остаточной прочностью морфоскульптуры (Q), описываемая уравнением $RH5 = 69\,209e^{-0{,}136Q}$, а также связь величины Q со временем t экспонирования каменных поверхностей: $t = (69\,209e^{-0{,}136Q} - 0{,}29)/0{,}0535$. Это позволяет выполнять абсолютную оценку времени экспонирования каменной морфоскульптуры в диапазоне голоцена.

На основе данных лихенометрии и теста остаточной прочности определено, что в исследуемом районе в раннем голоцене существовало более крупное оледенение, размеры которого превышали современное более чем в 10 раз, а краевые части ледников опускались до абсолютных отметок 1800 м. Его границы установлены по ареалу распространения крупных присклоновых каменных глетчеров абляционного типа, обнаруженных в пределах горного массива хр. Сунтар-Хаята.

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

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 11-05-00318-а).

Литература

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. // Материалы гляциол. исслед., 2006, вып. 101, с. 163–168.

Васьковский 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., МГУ, 1959, с. 510–556.

Галанин А.А. Лихенометрический метод в изучении современных геоморфологических процессов на Северо-Востоке России: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Владивосток, 1997, 22 с.

Галанин А.А. Лихенометрия: современное состояние и направления развития метода / А.А. Галанин. Магадан, СВКНИИ, 2002, 74 с.

Галанин А.А. Каменные глетчеры северо-востока Азии: картографирование и географический анализ // Криосфера Земли, 2009, т. XIII, № 4, с. 49–61.

Галанин А.А. Каменные глетчеры: вопросы терминологии и классификации // Вестн. СВНЦ ДВО РАН, 2010, № 4, с. 2–11.

Галанин А.А. Возраст последнего ледникового максимума на северо-востоке Азии // Криосфера Земли, 2012а, т. XVI, № 3, с. 39–52.

Галанин А.А. Каменные глетчеры Колымского нагорья // Лед и снег, 2012б, № 2 (118), с. 106–114.

Галанин А.А. Каргинский (МИС 3) возраст последнего ледникового максимума на северо-востоке Азии // Изв. РАН. Сер. геогр., 2012в, № 3, с. 81–93.

Галанин А.А. Лихенометрический метод изучения криогенных процессов // Наука и техника в Якутии, 2012г, № 1, с. 8–15.

Галанин А.А., Глушкова О.Ю. Лихенометрия // Вестн. РФФИ, 2003, № 3, с. 22–52.

Галанин А.А., Глушкова О.Ю. Строение и динамика бронированных ледников и каменных глетчеров хребтов Корякский и Искатень в позднем голоцене // Материалы гляциол. исслед., 2004, т. 97, с. 161–169.

Галанин А.А., Лыткин В.М., Федоров А.Н., Кадота Т. Сокращение ледников гор Сунтар-Хаята и методические аспекты его оценки // Лед и снег, 2013, № 4 (124), с. 30–42.

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.

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.

Корейша М.М. Режим современного оледенения хр. Сунтар-Хаята // Исследование ледников и ледниковых районов. М., Изд-во АН СССР, 1961, вып. 1, с. 136–153.

Корейша М.М. Современное оледенения хребта Сунтар-Хаята. М., Изд-во АН СССР, 1963, 170 с.

Некрасов И.А. Последнее оледенение и криолитозона Южного Верхоянья / И.А. Некрасов, Е.В. Максимов, И.В. Климовский. Якутск, Кн. изд-во, 1973, 151 с.

Соломина О.Н. Горное оледенение Северной Евразии в голоцене / О.Н. Соломина. М., Науч. мир, 1999, 262 с.

Соломина О.Н., Савоскул О.С. Ледники западной и северной периферии Тянь-Шаня за 2000 лет // Геоморфология, 1997, № 1, с. 78–86.

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, No. 4, p. 707–735.

Goudie A.S. The Schmidt Hammer in geomorphological research // Progress in Phys. Geography, 2006, vol. 30, p. 703–718.

Innes J.L. Lichenometry // Progress in Phys. Geography, 1985, vol. 9, No. 2, p. 187–254.

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, No. 13, p. 333–346.

Savoskul O.S. Application of lichenometry and tephrochronology in the dating of Holocene glacial deposits in Kamchatka // J. Volcanol. and Seismol., 2001, vol. 22, No. 5, p. 541–558.

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 // Quatern. Sci. Rev., 2006, vol. 25, iss. 21–22, p. 2846–2867.

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, vol. 14, No. 6, p. 899–910.

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 J. Geol. and Geophys., 2005, vol. 48, p. 105–116.

Поступила в редакцию
10 мая 2013 г.