

**Динамика оледенения в горах юга Восточной Сибири за последние 160 лет**© 2015 г. Э.Ю. Осипов<sup>1</sup>, О.П. Осипова<sup>2</sup><sup>1</sup>Лимнологический институт СО РАН, Иркутск; <sup>2</sup>Институт географии имени В.Б. Сочавы СО РАН, Иркутск  
*eduard@lin.irk.ru***Dynamics of mountain glaciation in the South-Eastern Siberia over the past 160 years**E.Y. Osipov<sup>1</sup>, O.P. Osipova<sup>2</sup><sup>1</sup>Limnological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk;  
<sup>2</sup>Sochava Institute of Geography, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk*Статья принята к печати 15 сентября 2014 г.**Восточная Сибирь, изменения климата, колебания ледников, малый ледниковый период.  
Climate change, East Siberia, glacier fluctuations, Little Ice Age.*

Современное оледенение в горах юга Восточной Сибири сосредоточено в основном на Восточном Саяне, в Байкальском хребте и на Кодаре. Последние детальные исследования ледников были выполнены на материалах аэрофотосъёмки 1950–60-х годов и требуют обновления. С использованием космических снимков среднего и высокого разрешения (Landsat ETM+, Cartosat-1, QuickBird-2, WorldView-1), полученных в 2001–2011 гг., и цифровой модели рельефа SRTM были построены карты для 51 ледника общей площадью около 15 км<sup>2</sup>. По конечно-моренным комплексам с привлечением данных лихенометрии реконструированы границы ледников для времени малого ледникового периода (МЛП). Установлено, что с конца МЛП (середина XIX в.) площадь ледников сократилась в среднем на 59% (или 0,37% за год), а их концы отступили на 550 м (3,5 м/год). Наибольшее сокращение площади установлено для ледников хр. Кодар (62%). В 2001–2011 гг. ледники сокращались на порядок быстрее, чем в 1850–2001 гг., что, вероятно, обусловлено повышением летней температуры воздуха в 1970–2000-х годах. Дегляциация в горах юга Восточной Сибири (особенно на Кодаре) происходила во второй половине XX в. интенсивнее, чем в других районах Сибири.

Changes in areas of glaciers in three South-East Siberian mountainous regions (East Sayan, Baikalsky and Kodar ridges) had been analyzed for the period since end of Little Ice Age (LIA) to the present time (about 160 years). It was determined that since the end of LIA area of these glaciers reduced, on the average, by 59% (or 0.37% per a year), and their termini retreated by 550 m (3.5 m/year). At the second half of 20<sup>th</sup> century deglaciation in mountains of South-Eastern Siberia proceeded more intensive than in other Siberian regions.

**Введение**

Баланс массы и объём горных ледников очень чувствительны к изменениям климата, главным образом к колебаниям летней температуры и количеству выпавших твёрдых осадков. После малого ледникового периода (МЛП), примерно с середины XIX в., во многих районах Земли ледники отступали в результате повышения температуры (так называемое «глобальное потепление»). Однако деградация ледников не была линейной: максимальные скорости отступления отмечены в первой половине XX в. и начиная с 1970-х годов [16]. В континентальной Сибири динамика ледников количественно изучалась на Алтае и северо-востоке Сибири [2, 14, 19, 21]. Гораздо меньше данных собрано по изменениям ледников юга Восточной Сибири. Ранее в работе [19] были оценены изменения длины и высоты концов ледников Северной Евразии (включая хр. Кодар) с середины XIX в. до 1950–80-х годов. В данной работе мы попытались количественно оценить изменения ледников в трёх горных районах Байкальской горной

области с конца МЛП по настоящее время на основе картирования ледников и моренных комплексов с использованием данных космической съёмки высокого разрешения.

**Районы и объекты исследования**

Объекты наших исследований — ледники, расположенные на двух высокогорных массивах Восточного Саяна (гора Мунку-Сардык и гора Топографов) в пределах высочайшего массива Байкальского хребта — горы Черского и в центральной части хр. Кодар (рис. 1). Таким образом, район исследований охватывал высокогорье Байкальской горной области. Гора Мунку-Сардык (3491 м) находится на российско-монгольской границе и представляет собой самую высокую вершину Восточного Саяна. Пик Топографов (3089 м) — самый высокий массив меридионального участка хр. Большой Саян.

Впервые ледники на южном (монгольском) склоне Мунку-Сардыка обнаружены в 1850–70-х годах экспедициями Г.И. Радде и А.Л. Чекановского. Однако первые регулярные



Рис. 1. Район исследований

Fig. 1. Study area

исследования четырёх ледников южного и северного склонов Мунку-Сардыка (общая площадь 1,68 км<sup>2</sup>) были выполнены С.П. Перетолчиным в 1896–1903 гг. [9]. Позже ледники и моренные комплексы Мунку-Сардыка исследовались Е.В. Максимовым [6] и сотрудниками иркутского Института географии [5]. По данным Каталога ледников СССР [3], основанном на дешифрировании аэрофотоснимков 1953–1958 гг., на массивах Мунку-Сардык и пике Топографов находится 12 ледников общей площадью 7,7 км<sup>2</sup>. Недавно, на основе высокоразрешающих космических снимков 2006–2008 гг., была проведена повторная инвентаризация 13 ледников этих двух массивов общей площадью 5,1 км<sup>2</sup> [8].

Байкальский хребет простирается вдоль западного побережья оз. Байкал. Его вершины достигают 1900–2200 м. На юго-восточном склоне наивысшего массива этого хребта (гора Черского, 2588 м), в его центральной части, в 1970–80-х годах впервые были обнаружены и исследованы два небольших ледника общей площадью около 0,6 км<sup>2</sup> [1]. С тех пор инвентаризация ледников не проводилась. Отметим, что эти ледники не были включены ни в Каталог ледни-

ков СССР, ни в Каталог ледников мира (World Glacier Inventory).

Хр. Кодар расположен на северо-восточной окраине Байкальской горной области. Некоторые его вершины достигают 2900 м над ур. моря, наиболее высокая вершина – гора БАМ (3072 м). Ледники хребта расположены в его центральной части (56,8–57,1° с.ш., 117,2–117,7° в.д.). Они были обнаружены относительно недавно и детально изучены в ходе экспедиций В.С. Преображенского в 1958–1959 гг. [11]. По данным Преображенского, оледенение Кодара представлено 31 ледником общей площадью около 15 км<sup>2</sup>. Позже, в Институте географии АН СССР на основе полевых данных и аэрофотоснимков 1948–1963 гг. был составлен Каталог, в который вошли 30 ледников общей площадью около 18,8 км<sup>2</sup> [4]. На основе материалов аэрофотосъёмки 1963 г. и полевых наблюдений Л.А. Пластинин [10] уточнил данные Каталога. В обновлённом каталоге было 39 ледников общей площадью 15,25 км<sup>2</sup>. Недавние исследования кодарских ледников касались химического состава снега и льда [13], изменения баланса массы [18], морфологии и температурного режима [7]. По-

## Характеристика использованных в работе космических снимков

Район	Снимок	Дата съёмки	Пространственное разрешение, м
Мунку-Сардык (Восточный Саян)	Quick Bird-2	29.08.2006	0,6
Пик Топографов (Восточный Саян)	WorldView-1	17.07.2008	0,5
		07.08.2008	
Г. Черского (Байкальский хребет)	WorldView-1	25.08.2011	0,5
Кодар	Cartosat-1 (IRS-P5)	14.08.2009	2,5
	Landsat-7 ETM+	11.07.2001	15–30
	Landsat-7 ETM+	13.08.2002	

следние измерения площади ледников выполнены по снимкам Landsat 2010 г. [20]; в результате закартировано 34 ледника с общей площадью открытого льда 11,72 км<sup>2</sup>.

### Материалы и методы

**Космические снимки.** Для картирования границ современных ледников и их моренных комплексов использованы летние сцены космических изображений WorldView-1, Quick Bird-2, Cartosat-1 и Landsat-7 (сенсор ETM+) с пространственным разрешением от 0,5 до 30 м, сделанные в 2001–2011 гг. (таблица). Все сцены были преобразованы в единую проекцию (UTM, WGS-84) и ортотрансформированы в программе ENVI 3.4 с помощью цифровой модели рельефа SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) и ряда опорных точек, координаты которых измеряли на местности с помощью GPS. Для снимков Landsat в ENVI 3.4 были построены цветосинтезированные изображения (каналы 7–5–3), на которых граница между снегом (льдом) и окружающими горными склонами выражена достаточно чётко [14]. Также использовался панхроматический диапазон (канал 8) Landsat с более высоким пространственным разрешением (15 м).

**Картирование ледников и морен.** Контуры ледников вручную оцифрованы по космическим снимкам в ГИС ArcView 3.2. Поскольку нижние части ледников часто покрыты моренными отложениями, возникали затруднения, связанные с точным определением границы ледника, поэтому измерялась площадь его открытой поверхности. Для минимизации ошибок использованы данные полевых исследований, а также архивные фотоснимки. На некоторых ледниках их границы измерены с помощью GPS (точность позиционирования  $\pm 5$  м). Многолетние снежники, свя-

занные с телами ледников в их верхних частях, включались в их контуры. Границы ледников во время МЛП (~1550–1850 гг.) были реконструированы по моренным отложениям. Незадернованные моренные комплексы хорошо выражены перед фронтом современных ледников. Для оценки возраста моренных комплексов проведены измерения диаметров талломов лишайника *Rhizocarpon Geographicum* на поверхности ледниковых отложений и бараньих лбов. Лихенометрические станции были заложены вблизи ледников № 5, 12 и 26 на Кодаре, № 31 на Мунку-Сардыке и № 1 на Байкальском хребте. Отсутствие абсолютных датировок морен не позволило нам построить региональные кривые роста лишайника, поэтому для оценки возраста морен использована кривая, полученная для Алтая [12].

Пространственные характеристики ледников, измеренные в ArcView 3.2 (с расширениями Spatial Analyst и Zonal Statistics) с использованием SRTM DEM (размер ячейки 60 × 90 м) и полевых GPS-измерений, были преобразованы в формат базы данных. Погрешность картирования ледников, связанная с пространственным разрешением космических снимков, принята равной одному пикселу для сцены Landsat ( $\pm 15$ –30 м) и двум пикселям для других сцен ( $\pm 1 \div 5$  м). Наличие облачности, сезонных снежников и затённости также относятся к источникам потенциальных ошибок картографирования. Для их оценки было проведено несколько независимых (шесть и более) измерений площади на отдельных ледниках. По нашим оценкам, суммарная погрешность измерения площади ледника находится в пределах 10%. Погрешность измерения высоты определяется точностью модели SRTM ( $\pm 16$  м) [17]. Тем не менее, фактическая ошибка SRTM, измеренная для ряда опорных точек (полевые GPS-измерения), не превышает 10 м.

**Анализ климатических изменений.** Мы учитывали среднемесячные данные по температуре и атмосферным осадкам, полученные на пяти гидрометеостанциях (ГМС): Иркутск, Орлик, Ильчир, Нижнегарск, Чара, Бодайбо (см. рис. 1). Кроме того, использованы средние месячные данные реанализа NCEP/NCAR 1949–2013 гг. [15], осреднённые по четырём узлам, наиболее близко расположенным к конкретному ледниковому району. Изменения температуры и осадков были рассчитаны по линейным трендам с использованием регрессионной модели.

### Обсуждение результатов

**Инвентаризация современных ледников.** Всего мы выполнили инвентаризацию 51 ледника (по космоснимкам 2006–2011 гг.) общей площадью 14,8 км<sup>2</sup> (рис. 2), в том числе трёх – на Мунку-Сардыке (0,64 км<sup>2</sup>), десяти – на пике Топографов (4,51 км<sup>2</sup>), двух – на Байкальском хребте (0,51 км<sup>2</sup>) и 36 – на Кодаре (9,12 км<sup>2</sup>). Ледники Восточного Саяна относятся к самым высоко расположенным в регионе. Высота ледников пика Топографов находится в пределах 2330–2908 м, а Мунку-Сардыка – 2804–3490 м. Средняя высота ледников на Мунку-Сардыке выше, чем на пике Топографов на 560 м. По морфологии преобладают каровые (пять) и карово-долинные (четыре) ледники, по экспозиции – ледники северо-восточной (четыре) и северо-западной (три) экспозиций. Площадь девяти ледников – менее 0,5 км<sup>2</sup>, трёх ледников – 0,5–1,0 км<sup>2</sup> и одного (№ 3) – более 1 км<sup>2</sup>. Длина девяти ледников – менее 1 км и только одного ледника (№ 18, пик Топографов) – более 2 км. Два небольших каровых ледника в верховьях р. Куркула (Байкальский хребет) – самые низко расположенные в районе исследований (1796–2138 м) и, вероятно, в Восточной Сибири (см. рис. 2).

На Кодаре в 2001–2002 гг. было 42 ледника общей площадью 11,68 км<sup>2</sup>. Из них к 2009 г. сохранилось 36 ледников общей площадью 9,12 км<sup>2</sup> (см. рис. 2). По сравнению с данными предыдущей инвентаризации [4, 10] пять ледников исчезли (№ 17, 18, 28, 38 и 40), но в новый каталог были включены ледники № 41 и 45. Ледники хр. Кодар расположены на высоте 1875–2792 м (средняя высота  $2326 \pm 162$  м), средняя высота фирновой линии  $2287 \pm 164$  м

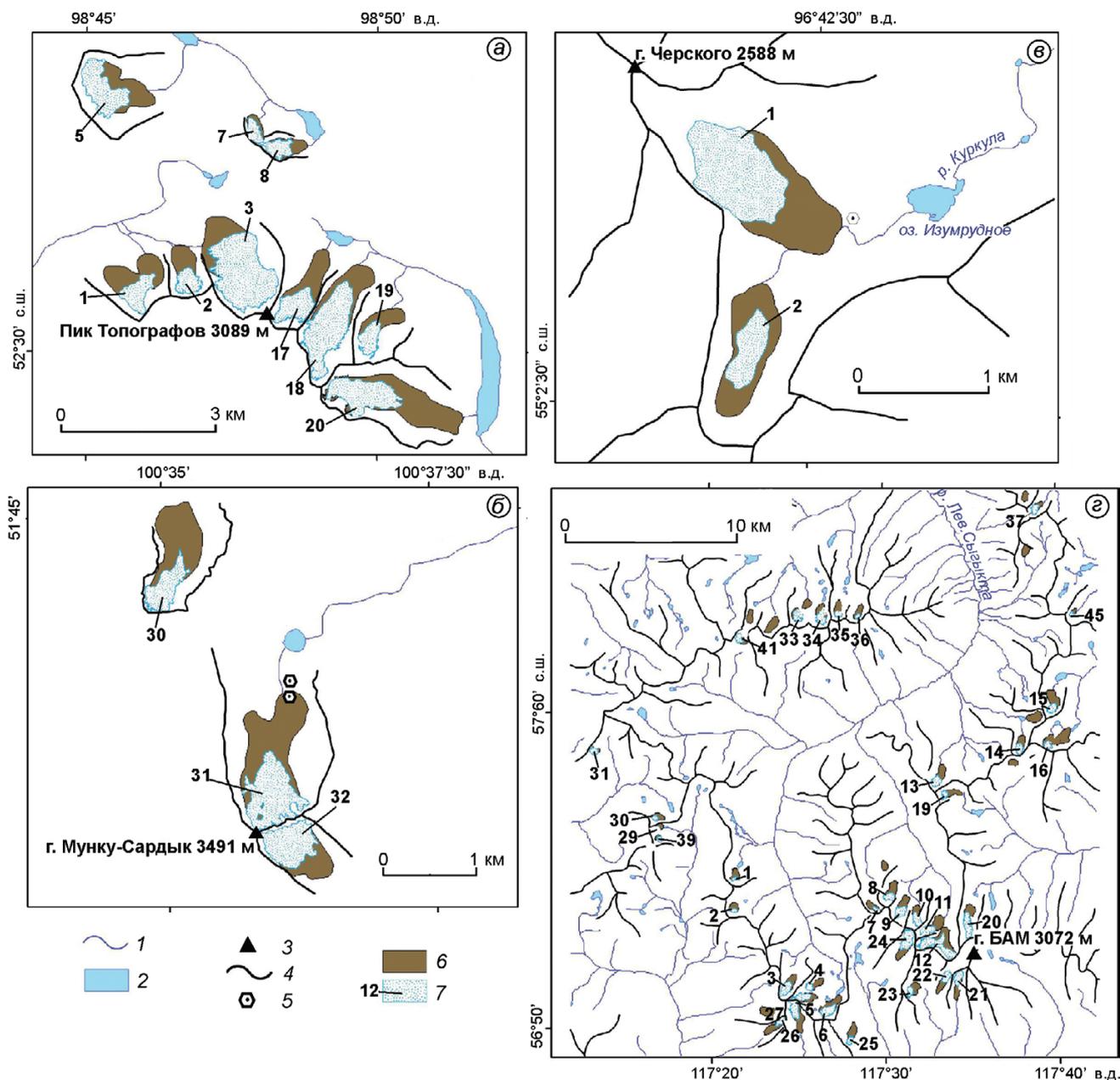
( $n = 30$ ). Преобладают каровые (23) и карово-долинные (8) ледники. Площадь 32 ледников – менее 0,5 км<sup>2</sup> (70% общей численности), трёх ледников – 0,5–1,0 км<sup>2</sup> и только один ледник (№ 12) имеет площадь более 1 км<sup>2</sup>. Большинство ледников имеют северную (14) и северо-восточную (11) экспозиции.

### *Изменения площади ледников с конца МЛП.*

По конечным моренам были реконструированы контуры 61 ледника общей площадью 31,65 км<sup>2</sup>. Отметим, что реконструкция была проведена только для ледников, ранее включённых в один из известных каталогов [3, 4, 10], поэтому суммарная площадь – минимальная оценка общей площади оледенения района во время МЛП. Средний размер лишайников на конечных моренах ледников изменяется от 25,7 мм (ледник № 26, Кодар) до 41,4 мм (ледник № 31, Мунку-Сардык), что соответствует началу их колонизации в 1680–1820 гг. Таким образом, время формирования моренных комплексов соответствует финальной фазе МЛП (условно 1850 г.).

По нашим данным, с 1850 по 2006–2011 гг. площадь ледников в районе исследований сократилась в среднем на 59% (0,37 %/год). Ледники пика Топографов потеряли 45% площади (0,29 %/год), Мунку-Сардыка и Байкальского хребта – 53% (0,34 %/год), Кодара – 62% (0,39 %/год с учётом исчезнувших ледников). Площадь одних ледников Восточного Саяна сократилась на 22% (ледник № 3, 0,14 %/год), а других – на 67% (№ 20, 0,42 %/год). Кодарские ледники потеряли от 31% (ледник № 24, 0,20 %/год) площади до 100%. За этот же период длина ледников сократилась в среднем на 550 м (3,5 м/год). Для Байкальского хребта эта величина составила 330 м (2,1 м/год), а для Восточного Саяна – 610 м (3,9 м/год). Минимальная высота ледников увеличилась от 50 м (Байкальский хребет, 0,3 м/год) до 120 м (Восточный Саян, 0,8 м/год).

С 1850 по 2001–2002 гг. ледники потеряли около 44% площади, а с 2001–2002 по 2006–2011 гг. – около 27%. В 2001–2011 гг. скорость дегляциации была в 5 (пик Топографов) – 13 (Кодар) раз больше, чем в предшествующий период (1850–2001 гг.). Ранее [20] отмечалось резкое увеличение скорости (в 28 раз) между периодами 1974–1995 гг. (0,11 %/год) и 1995–2001 гг. (3,12 %/год). Наши данные также показывают, что относительное сокращение площади лед-



**Рис. 2.** Современные и реконструированные (малый ледниковый период) ледники района исследований: а – пик Топографов (Восточный Саян); б – Мунку-Сардык (Восточный Саян); в – Черского (Байкальский хребт); з – Кодар; 1 – реки; 2 – озёра; 3 – вершины; 4 – хребты; 5 – лихенометрические станции; 6 – ледники малого ледникового периода; 7 – современные ледники

**Fig. 2.** Contemporary and reconstructed (Little Ice Age) glaciers of the study area: а – Peak Topograf (East Sayan); б – Munku-Sardyk (East Sayan); в – Mt. Cherskogo (Baikalsky Range); з – Kodar Range; 1 – rivers; 2 – lakes; 3 – summits; 4 – ranges; 5 – stations of lichen measurements; 6 – Little Ice Age glaciers; 7 – contemporary glaciers

ников резко увеличилось в конце XX в. и продолжалось в течение первого десятилетия XXI в. До 2002 г. скорость сокращения площади была почти одинаковой для всех районов (40–45%, 0,27–0,30 %/год), однако затем мы наблюдаем пространственные различия в реакции ледни-

ков: от 9% (пик Топографов, 1,27 %/год) до 32% (Кодар, 3,98 %/год). При этом восемь ледников Кодара в 2001–2009 гг. исчезли полностью.

Сравнение полученных данных с данными первых Каталогов [3, 4] показало, что ледники пика Топографов и Кодара с 1953–1963 по 2001–

2002 г. сократились по площади соответственно на 8% (0,17 %/год) и 23% (0,55 %/год). Из этого следует, что сокращение площади ледников в 1960–90-х годах было умереннее, чем в первое десятилетие XXI в.

По данным исследования [19], масштабы сокращения ледников с конца МЛП до 1950–80-х годов в континентальной Сибири были намного меньше, чем в Центральной Азии и Тихоокеанском секторе. Однако имеется ряд данных об относительно умеренной дегляциации в горах северо-восточной и юго-западной Сибири. Так, М.Д. Ананичева и др. [2] оценивают сокращение ледников на хр. Черского в 1970–2001 гг. в 28% (0,9 %/год), а в горах Сунтар-Хаята – в 19% (0,3 %/год). С. Гурней и др. [14] оценили сокращение площади ледников массива Буордах (хр. Черского) с 1850 по 2001 г. минимальной величиной – 17% (0,1 %/год). Незначительное сокращение площади в 1945–2003 гг. (7%, 0,1 %/год) установлено А.Б. Суразаковым и др. [21] для ледников бассейна Актру (Алтай). В то же время, по нашим данным, ледники Кодара в 1850–2001 гг. потеряли гораздо больше – 45% (0,3 %/год). Недавно К. Стокс и др. [20] оценили площадь сокращения ледников Кодара в 1995–2010 гг. в 40%. В целом полученные данные свидетельствуют о более значительном сокращении ледников в горах юга Восточной Сибири с конца МЛП (в среднем на 58%). Судя по всему, ледники Кодара наиболее чувствительны к климатическим изменениям последних десятилетий в Сибири.

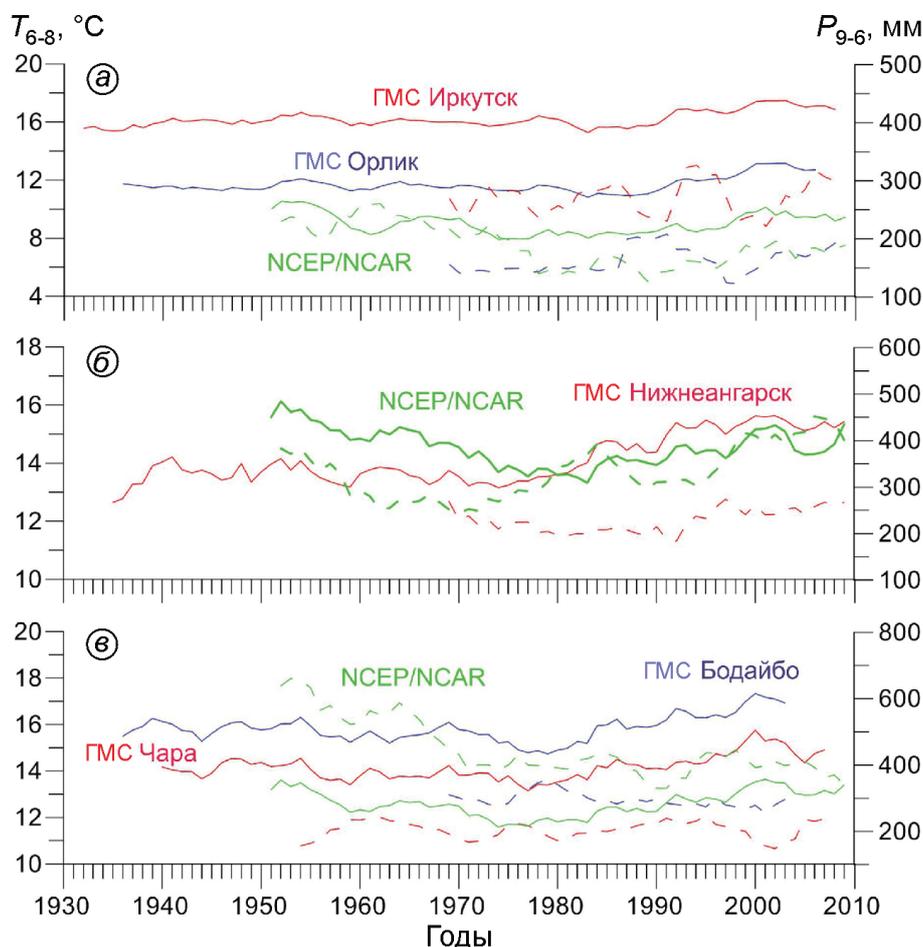
**Климатические изменения.** К наиболее значимым климатическим характеристикам, связанным с балансом массы ледников, относятся средняя летняя (июнь–август) температура воздуха  $T_{6-8}$  и сумма осадков периода аккумуляции, т.е. сентября–июня,  $P_{9-6}$ . Сглаженные ряды  $T_{6-8}$  и  $P_{9-6}$  по данным пяти ГМС и реанализа NCEP/NCAR показаны на рис. 3. С середины 1970-х до середины 2000-х годов летние температуры повысились во всех районах. За период 1970–2010 гг. летняя температура на ГМС Иркутск увеличилась на 1,7 °С, а на ГМС Нижнеангарск – на 2,6 °С. В районе Байкальского хребта потепление началось несколько раньше (с середины 1970-х годов), чем на Восточном Саяне (с середины 1980-х годов). Максимальная температура повсеместно отмечалась в 2001–2002 гг.

Наибольший рост летней температуры был на ГМС Орлик (1986–2005 гг., +2,4 °С), а наименьший – на ГМС Чара (1981–2005 гг., +1,7 °С).

В целом, по данным ГМС Иркутск, период 2001–2005 гг. был самым тёплым за последние 130 лет. Следующая пятилетка (2006–2010 гг.) была холоднее предыдущей на 0,6–1,2 °С (наибольшее похолодание отмечено на ГМС Орлик), т.е. в 2006–2010 гг. наблюдались благоприятные температурные условия для восстановления баланса массы ледников. Однако, учитывая инерционность ледниковых изменений по сравнению с климатическими, ускоренное сокращение площади ледников в 2001–2010 гг. (по сравнению с 1850–2001 гг.) можно объяснить повышением летней температуры во время двух–трёх последних десятилетий XX в., что подтверждается и другими исследованиями [20].

В отличие от температуры осадки периода аккумуляции демонстрирует слабую пространственную корреляцию, что свидетельствует о сильном влиянии местных условий (высота, рельеф и т.д.) на снегонакопление. За период 1970–2010 гг. значимое увеличение твёрдых осадков установлено только на ГМС Нижнеангарск (+57 мм). Возможно, более умеренное сокращение площади ледников Байкальского хребта (по сравнению с другими ледниковыми районами) объясняется повышенной аккумуляцией снега в последние десятилетия (особенно с 1990-х годов).

**Связь локальной топографии со скоростью дегляциации.** Для установления зависимости между изменением площади ледников Байкальской горной области за период 1850–2010 гг. и локальными условиями их топографии (площадь, минимальная, максимальная и средняя высота, вертикальный диапазон, уклон поверхности ледников, экспозиция) использовалась линейная регрессионная модель. Статистически значимая связь выявлена между сокращением площади ледника и его размером: чем меньше ледник, тем больше его относительное сокращение ( $n = 57$ ,  $r^2 = 0,16$ ;  $p < 0,002$ ) и меньше абсолютное ( $n = 57$ ;  $r^2 = 0,60$ ;  $p < 0,0001$ ). Аналогичные зависимости установлены и для отдельных районов Кодара и Восточного Саяна, хотя в последнем случае значимая связь наблюдается только с абсолютными изменениями, т.е., в целом более крупные ледники теряли меньшую площадь в относительном выражении, но большую в абсолютном и наобо-



**Рис. 3.** Временные ряды (5-летние скользящие средние) средней летней температуры воздуха  $T_{6-8}$  (сплошная линия) и суммы осадков периода аккумуляции  $P_{9-6}$  (пунктирная линия) по данным ГМС и реанализа NCEP/NCAR: *a* – Восточный Саян; *б* – Байкальский хребет; *в* – хр. Кодар

**Fig. 3.** Time series (5-year running average) of mean summer temperature  $T_{6-8}$  (solid line) and total precipitation of accumulation period  $P_{9-6}$  (dotted line) according to data of weather stations (ГМС) and reanalysis NCEP/NCAR: *a* – East Sayan; *б* – Baikalsky Ridge; *в* – Kodar Ridge

рот. Подобная зависимость, только для относительного сокращения размера ледников в 1995–2010 гг., характерна и для ледников Кодара [20].

Значимые связи обнаружены также между относительным сокращением площади и минимальной высотой ледника ( $n = 57$ ;  $r^2 = 0,12$ ;  $p = 0,008$ ), а также средним уклоном ледниковой поверхности ( $n = 49$ ;  $r^2 = 0,11$ ;  $p = 0,019$ ): ледники, расположенные на более низких высотах, а также ледники с большими уклонами сократились в большей степени. И хотя статистически значимой связи между сокращением ледника и его экспозицией не наблюдается, ледники, ориентированные на север и северо-восток, потеряли в сумме наибольшую площадь (60% общего сокращения).

Большинство ледников в районах исследования – небольшие по размерам (85% ледников имеют площадь  $< 0,5 \text{ км}^2$ ), поэтому связь морфологии ледниковых бассейнов с динамикой ледников вполне ожидаема. Кроме того, ледники (особенно кодарские) находятся в зоне повышенной сейсмической активности, и значительная часть обломочного материала поступает на поверхность ледников во время многочисленных землетрясений. В условиях отрицательного баланса массы и низкой динамической активности ледники часто трансформируются в массивы мёртвого льда. Такой механизм дегляциации типичен для небольших ледников Кодара, многие из которых уже полностью погребены моренным чехлом.

### Заключение

Большая часть ледников в горах юга Восточной Сибири изучалась ещё в 1950–60-х годах, в основном по материалам аэрофотосъёмки и экспедиционных исследований. В 2006–2011 гг. с использованием высокоразрешающих космических снимков была проведена повторная инвентаризация ледников в Восточном Саяне (массивы Мунку-Сардык, пик Топографов), на Байкальском хребте и Кодаре. По конечно-моренным комплексам реконструированы границы ледников в малый ледниковый период. Установлено, что с 1850 по 2011 г. площадь ледников сократилась в среднем на 59% (0,37 %/год). В отдельных районах Байкальской горной области сокращение ледников варьирует от 45% (пик Топографов) до 62% (Кодар, с учётом исчезнувших ледников). Резкое (на порядок) возрастание скорости дегляциации по сравнению с предыдущим периодом отмечено в 2001–2011 гг. Основной причиной интенсивного сокращения ледников в 2001–2011 гг., вероятно, стало повышение летней температуры воздуха (на 2,5 °С) в 1970–2000-х годах. Выявленные различия в реакции ледников (а также исчезновение отдельных ледников Кодара) на рост региональной температуры объясняются пространственными неоднородностями аккумуляции, местной топографией и геологической (сейсмической) активностью. Полученные данные свидетельствуют о наибольшей (в Сибири) чувствительности исследованных ледников (особенно Кодара) к изменениям климата во второй половине XX в.

**Благодарности.** Авторы выражают свою признательность В.М. Плюснину за ценные замечания к первоначальному варианту рукописи.

Настоящее исследование поддержано РФФИ (грант № 11-05-00713) и Отделением наук о Земле РАН (проект № 12.11).

### Литература

1. Алешин Г.В. Современные ледники и их рельефообразующее значение на Байкальском хребте // География и прир. ресурсы. 1982. № 4. С. 133–136.
2. Ананичева М.Д., Капустин Г.А., Корейша М.М. Изменение ледников гор Сунтар-Хаята и хр. Черского по данным Каталога ледников СССР и космическим снимкам 2001–2003 гг. // МГИ. 2006. Вып. 101. С. 163–169.
3. Каталог ледников СССР: Т. 16. Ангаро-Енисейский район. Вып. 1. Енисей. Ч. 5. Вып. 2. Ангара. Ч. 1. Л.: Гидрометеиздат, 1973. С. 9–37.
4. Каталог ледников СССР: Т. 17. Ленско-Индибирский район. Вып. 2. Средняя Лена. Ч. 1. Бассейны рек Чары и Витима, хребет Кодар. Л.: Гидрометеиздат, 1972. С. 9–23.
5. Китов А.Д., Коваленко С.Н., Плюснин В.М. Итоги 100-летних наблюдений за динамикой гляциальных геосистем массива Мунку-Сардык // География и прир. ресурсы. 2009. № 3. С. 101–108.
6. Максимов Е.В. О ледниках массива Мунку-Сардык в Восточном Саяне // Изв. ВГО. 1965. Т. 97. Вып. 2. С. 176–180.
7. Осипов Э.Ю., Осипова О.П., Голобокова Л.П. Оценка современного состояния южного Сыгыттинского ледника – одного из крупнейших ледников хр. Кодар // Лёд и Снег. 2012. № 2 (118). С. 51–58.
8. Осипов Э.Ю., Ашметьев А.Ю., Осипова О.П., Клевцов Е.В. Новая инвентаризация ледников в юго-восточной части Восточного Саяна // Лёд и Снег. 2013. № 3 (123). С. 45–54.
9. Перетолчин С.П. Ледники хребта Мунку-Сардык // Изв. Томского технол. института. 1908. Т. 9. Вып. 1. 47 с.
10. Пластинин Л.А. Дистанционно-картографическое изучение нивально-гляциальных комплексов горных районов Сибири (морфология и динамика ледников, снежников и наледей хребта Кодар в Забайкалье). Иркутск: изд. Иркутского гос. технологич. ун-та, 1998. 142 с.
11. Преображенский В.С. Кодарский ледниковый район (Забайкалье), IX раздел программы МГГ (гляциология), № 4 / Ред. Г.А. Авсюк. М.: изд. АН СССР, 1960. 74 с.
12. Соломина О.Н. Горное оледенение Северной Евразии в голоцене. М.: Научный мир, 1999. 272 с.
13. Чебыкин Е.П., Осипов Э.Ю. Элементный состав снежно-фирновой толщи ледника Советских Географов и смежных с ним гидрологических объектов (хребет Кодар) // Лёд и Снег. 2010. № 4 (112). С. 30–40.
14. Gurney S.D., Popovnin V.V., Shahgedanova M., Stokes C.R. A glacier inventory for the Buordakh Massif, Cherskiy Range, Northeast Siberia, and evidence for recent glacier recession // Arctic, Antarctic and Alpine Research. 2008. V. 40 (1). P. 81–88.
15. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woolen J., Zhu Y., Leetmaa A., Reynolds R., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Jenne R., Joseph D. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project // Bull. Amer. Meteorol. Society. 1996. V. 77. P. 437–471.
16. Oerlemans J. Extracting a Climate Signal from 169 Glacier Records // Science. 2005. V. 308 (675). P. 675–677.

17. *Rodriguez E., Morris C.S., Belz J.E., Chapin E.C., Martin J.M., Daffer W., Hensley S.* An Assessment of the SRTM Topographic Products. Techn. Rep. JPL D-31639. 2005. Pasadena, California. P. 143.
18. *Shahgedanova M., Popovnin V., Aleynikov A., Stokes C.R.* Geodetic mass balance of Azarova Glacier, Kodar mountains, eastern Siberia, and its links to observed and projected climatic change // *Annals of Glaciology*. 2011. V. 52 (58). P. 129–137.
19. *Solomina O.N.* Retreat of mountain glaciers of northern Eurasia since the Little Ice Age maximum // *Annals of Glaciology*. 2000. V. 31. P. 26–30.
20. *Stokes C.R., Shahgedanova M., Evans I.S., Popovnin V.V.* Accelerated loss of alpine glaciers in the Kodar Mountains, south-eastern Siberia // *Glob. Plan. Chan.* 2013. V. 101. P. 82–96.
21. *Surazakov A.B., Aizen V.B., Aizen E.M., Nikitin S.A.* Glacier changes in Siberian Altai Mountains, Ob river basin (1952–2006) estimated with high resolution imagery // *Environmental Research Letters*. 2007. V. 2. P. 1–7.

### Summary

At the present time, glaciers in mountains of the South-Eastern Siberia are mainly located on East Sayan (Munku-Sardyk and Topographers' massifs), Baikalsky, and Kodar ridges. Previous detailed studies of the glaciers, performed 1950–1960's by means of aerial photographs, should be updated. We have created a new glacier inventory including 51 glaciers with total area of about 15 km<sup>2</sup> (13 glaciers on East Sayan, 2 glaciers on Baikalsky ridge and 36 glaciers on Kodar ridge). Satellite images of medium to high-resolution (Landsat ETM+, Cartosat-1, Quick-

Bird-2, WorldView-1), obtained in 2001–2011, and digital model (SRTM) were used to delineate new glacier boundaries. Geomorphological mapping of end moraines located in the vicinities of the present-day glaciers together with lichenometry methods allowed reconstructing outlines of 61 glaciers (with total area of about 32 km<sup>2</sup>) during the Little Ice Age (LIA) period. It has been found that from end of the LIA (~1850 AD) to 2006–2011 exposed ice areas decreased, on average, by 59% (0.37 %/year) and the glacier termini retreated by 550 m (3.5 m/year). The greatest reduction in ice area has been established on the Kodar range (62% from 1850 to 2009). During 2001–2011 glaciers shrunk much faster than during 1850–2001, probably due to a significant (by 2.5 °C) increase in summer temperatures. Data of weather stations and the NCEP/NCAR reanalysis demonstrated that summer temperatures significantly rose from mid-1970s to mid-2000s while the winter precipitation did show rather weak spatial correlation. Spatial differences in the glaciers responses to the climate are explained by features of snow accumulation and local topography of studied glaciers (glacier size, elevation, altitude range, ice surface slope, and aspect). Statistically significant relationships have been revealed between the ice area change and glacier size, minimal ice elevation and mean ice slope. As compared with other Siberian regions (e.g. North-Eastern Siberia and the Altai mountains), the relative deglaciation in the South-Eastern Siberia mountains during the second half of 20th century was the most intensive (especially, on the Kodar Ridge).