

А.Д. Китов¹, В.М. Плюснин², И.Н. Биличенко³

ИЗМЕНЕНИЕ ЛЕДНИКОВ В ГИМАЛАЯХ И ЮЖНОЙ СИБИРИ ПО ДАННЫМ LANDSAT

АННОТАЦИЯ

В работе рассматриваются локальные особенности ледников отдельных горных массивов Азии на примере трансграничного трансекта в меридиональном направлении от широт средней тайги Прибайкалья до центральной части Гималаев. Горные массивы представляют наиболее уязвимые и часто реликтовые геосистемы. Особенно высокой чувствительностью к изменениям климата обладают нивально-гляциальные и гольцовые геосистемы. Как в Южной Сибири, так и Гималаях происходит постоянное сокращение современных ледников. Особенно хорошо прослеживается открытая часть ледников, наиболее динамичная и чувствительная к изменению климата. Данные Landsat позволяют оценить изменение ледников на разных широтах в близких временных интервалах с начала 1970-х. В результате анализа таких данных удалось выявить общие тенденции изменения и некоторые аномалии (особенно в 2014–2015 годах до и после землетрясения в мае 2015 года), проявившиеся на всех рассматриваемых ледниках. Исследовались изменения ледников в хребте Кодар (ледник Азаровой, № 20), в Восточном Саяне (ледник Перетолчина, № 31 и Топографов, № 18), в Гималаях (Кхумбу, № 133 и в национальном парке Лангтанг: Лирунг, Юбра, Гхонне).

Сравнительный анализ этих ледников показал, что средняя скорость изменения площади рассматриваемых семи ледников в начале 1970-х составляла $-0,176$ км²/год, к началу 2000-х она замедлилась до $-0,123$, а к настоящему времени – до $-0,047$. Хотя у ледников Гхоне, Лирунг и особенно у Перетолчина она увеличивается. Отмечается не только сокращение, но и стабилизация состояния ледников в некоторые годы за последние 50 лет. Анализ выполнялся с использованием ГИС, баз данных ледников и космических снимков Landsat.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Восточный Саян, Гималаи, ГИС, динамика горных ледников, космоснимки

¹ Институт географии им. В.Б.Сочавы СО РАН, ул. Улан-Баторская, 1, 664033, Иркутск, Россия, e-mail: kitov@irigs.irk.ru

² Институт географии им. В.Б.Сочавы СО РАН, ул. Улан-Баторская, 1, 664033, Иркутск, Россия, e-mail: plyusnin@irigs.irk.ru

³ Институт географии им. В.Б.Сочавы СО РАН, ул. Улан-Баторская, 1, 664033, Иркутск, Россия, e-mail: bilichenco@irigs.irk.ru

Aleksandr D. Kitov¹, Viktor M. Pluysnin², Irina N. Bilichenko³

CHANGE OF GLACIERS IN THE HIMALAYAS AND SOUTHERN SIBERIA ACCORDING TO LANDSAT

ABSTRACT

We consider the local peculiarities of glaciers. We have researched the glaciers of separate mountain ranges in Asia from middle Taiga of the Pribaikalie to the central part of the Himalayas. The mountains are the most vulnerable and often relict geosystems. Especially high sensitivity to changes of climate have nival-glacial and golets geosystems. Modern glaciers constantly declining in the Southern Siberia and the Himalayas. The open part of the glaciers, which are the most dynamic and sensitive to climate change, especially clearly visible on spatial images. Landsat data provide an indication of the change of glaciers at different latitudes and close time intervals since the early 1970's. As a result, the analysis of such data, we were able to identify common trends and anomalies (especially in 2014–2015 years, before and after the earthquake in May 2015) demonstrated on all the glaciers. Studied changes of the glaciers of the Kodar Ridge (Azarova glacier, No 20), of the East Sayan (the Peretolchina glacier, No 31 and the Topografov glacier, No 18), of the Himalayas (the Khumbu glacier, No 133 and in the Langtang National Park: Lirung, Jubra, Ghonne glaciers).

The comparative analysis of these glaciers showed that the average rate of change of the area, these glaciers, in the early 1970's was $-0.176 \text{ km}^2/\text{year}$ to the beginning of the 2000's it slows up -0.123 , and up to date -0.047 . Although glaciers Ghone, Lirung, especially Peretolchina it increases. We've noticed reduced of the glaciers, but also stabilizing of the glaciers in some years during of the past 50 years. The analysis was performed using GIS, databases, glaciers and satellite images Landsat.

KEYWORDS: East Sayan Mountains, the Himalayas, GIS, dynamics of mountain glaciers, space images

ВВЕДЕНИЕ

Отмечаемое в настоящее время потепление климата отражается на состоянии современного оледенения в различных горных районах. Ошибочное сообщение о резком стаивании ледников в Гималаях [IPCC, 2007] к 2035 году и возможном их сокращении по результатам моделирования к 2100 году на 73–96 % [Shea et al., 2015] вызвало необходимость проверки этого факта. В результате выяснилось, что ледники Гималаев изменяются не катастрофично и они не исчезнут к середине нашего столетия. Кроме того, наблюдались периоды замедления и ускорения потепления и соответственно стационарное состояние и даже наступание некоторых ледников в разных горных системах [Котляков и др., 2017]. Кроме того, в исследованиях [Wagnon et al., 2007] показано, что малые ледники в районе Эвереста интенсивнее реагируют на потепление, чем большие, реакция которых незначительна.

Дендрохронологические реконструкции указывают, что последнее ускорение потепления наблюдается с 1980-х годов, а предыдущее замедление было в 1960-70-х [Котляков и др., 2017]. По дендрохронологическим исследованиям озёрных отложений [Stepanova et al.,

¹ V.B.Sochava Institute of Geography SB RAS, Ulan-Batorskay st., 1, 664033, Irkutsk, Russia, e-mail: kitov@irigs.irk.ru

² V.B.Sochava Institute of Geography SB RAS, Ulan-Batorskay st., 1, 664033, Irkutsk, Russia, e-mail: plyusnin@irigs.irk.ru

³ V.B.Sochava Institute of Geography SB RAS, Ulan-Batorskay st., 1, 664033, Irkutsk, Russia, e-mail: bilichenko@irigs.irk.ru

2015] в районе ледника Перетолчина (Мунку-Сардык) выявляются периоды отступления ледника 1900–1965 и 1983–2000 годов с одновременным повышением прироста деревьев и скорости осадконакопления и наступания ледника в 1965–1980 годах с замедлением прироста деревьев и снижением скорости осадконакопления.

В связи с этим выявление закономерностей изменения ледников и их поведения в разных горных территориях представляет самостоятельный интерес. В данном исследовании рассматривается изменение некоторых ледников в Гималаях в национальном парке Лангтанг и Сагарматха (в районе Эвереста) в сравнении с малыми ледниками в хребте Кодар и Восточном Саяне (массив Мунку-Сардык и пик Топографов) (рис. 1).

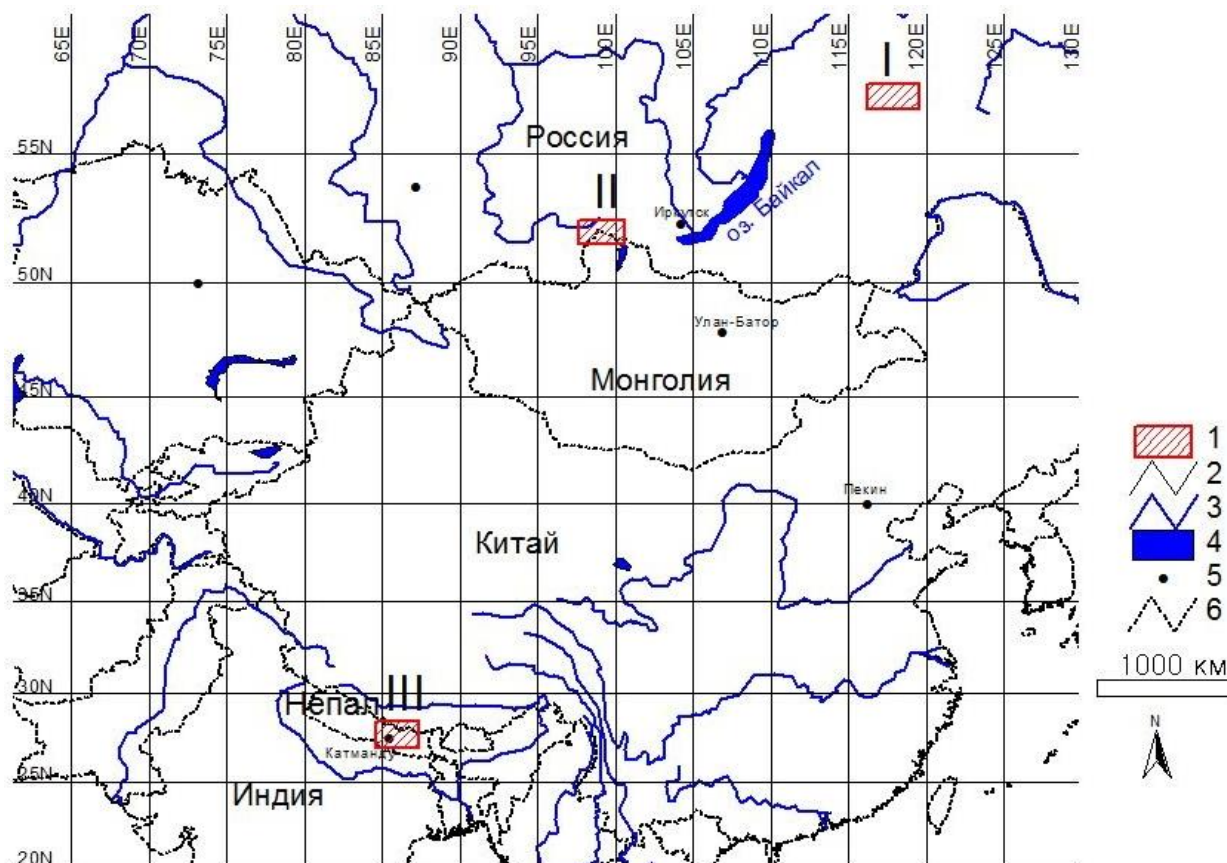


Рис. 1. Исследуемые территории:

- 1 – ключевые участки (I – хребет Кодар; II – Восточный Саян; III – Гималаи);
- 2 – координатная сетка (долгота/широта); 3 – реки; 4 – озёра;
- 5 – города; 6 – границы государств

Fig. 1. The studied territory:

- 1 – key areas (I – Kodar ridge; II – East Sayan mountains; III – Himalayas);
- 2 – coordinate grid (longitude/latitude); 3 – rivers; 4 – lakes;
- 5 – cities; 6 – state borders

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данном исследовании использованы материалы полевых работ, данные дистанционного зондирования Земли, картографические материалы и информация гляциологических баз данных (каталогов ледников). На сайте USGS доступны космоснимки Landsat с 1972 года различного пространственного разрешения. Сканер MSS (Landsat 1, 2) имеет разрешение 80 м в 4-х спектральных каналах, сканеры TM, ETM, LC (Landsat 5, 7, 8 соответственно) – 30 м (15 м в панхроматическом канале) и больше спектральных каналов, что

расширяет возможности RGB-синтеза. Соответственно точность оценки площади и длины ледника зависят от этих параметров и составляет порядка 10–15 % при сравнении характеристик ледников в разные временные интервалы.

Ледники можно наблюдать в узком сезонном диапазоне года. Для ледников Гималаев это конец октября – начало ноября. Хотя муссон отстывает обычно в середине октября, но бывают ненастные дни; в декабре хотя доля осадков незначительна, но они уже не тают на высотах нижней части ледника, да и на более высоких отметках образуют сезонные снежники, что затрудняет выделение границы ледника.

Для анализа изменения ледников с помощью программного обеспечения ГИС ArcView 3.2 создавались ГИС-проекты. Для территорий Гималаев использовались топографические и туристические карты и космоснимки Landsat в проекции UTM 45 зоны. Использовался в основном RGB-синтез 2-4-7 каналов для Landsat 7 и 3-5-7 – Landsat 8. В случае необходимости производилось улучшение по 8-му (панхроматическому) каналу до 15 м. Данные совмещались и производилась их векторизация. Открытой частью ледника считалась та его часть, где сохранялся снег и открытый лёд, хотя собственно залежи многолетнего льда продолжались под поверхностными моренами.

В районе Эвереста (Сагарматха, Джомолунгма (Sagarmatha, Chomolungma), 8 848 м) исследовался наиболее доступный и популярный ледник Кхумбу, его долинная часть (рис. 2). За верхнюю границу ледника принята изолиния 5 400 м по северному истоку со стороны вершин Лингтрэн (Lingtren, 6 713 м) и Кхумбутсе (Khumbutse, 6 639 м), а с восточного истока примерно на этой же высоте – по низу ледопада Кхумбу, текущего из Долины Молчания (Western Cwm – западный цирк Эвереста) [Higuchi et al., 2015]. На рис. 2 видно, что северный исток в настоящее время практически стаял и представляет собой каменный глетчер; лёд сохранился только в зоне питания у главного гребня.

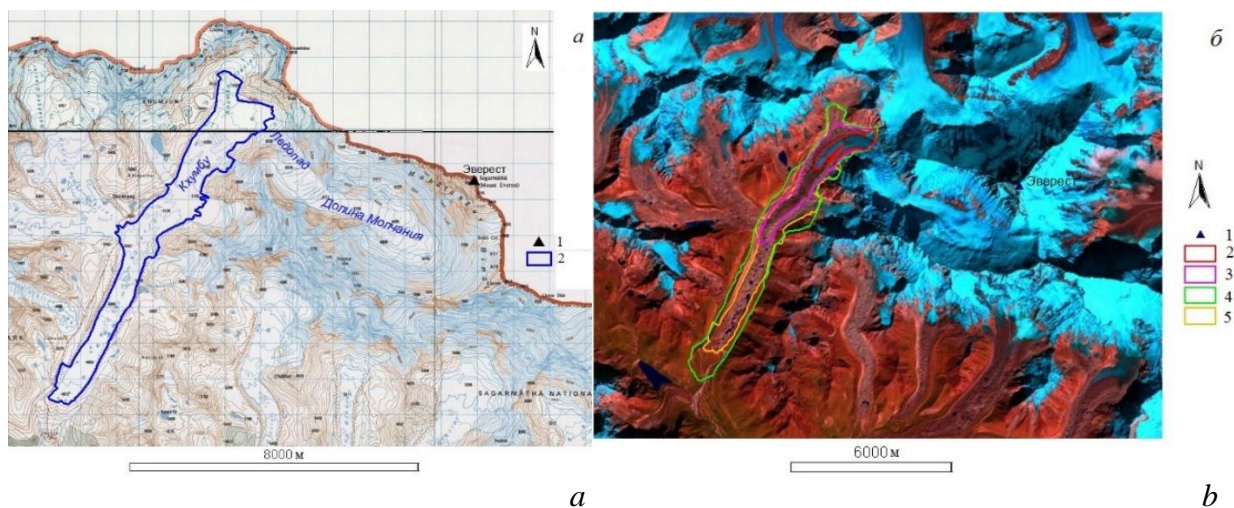


Рис. 2. Местность Кхумбу: *а* – границы ледника Кхумбу по топокарте (1 – вершина Эверест, 8 848 м; 2 – граница нижней долинной части ледника Кхумбу);

б – динамика ледника Кхумбу (1 – вершина Эверест; 2 – видимая часть ледника в 2017 году, 3 – 1987, 4 – 1972, 5 – 1992 по топокарте).

Фон – космоснимок Landsat 8 21.10.2017

Fig. 2. District Khumbu: *a* – borders of the Khumbu glacier on the topographic map (the Everest top, 8848 m; 2 – the border of bottom part of the Khumbu glacier);

b – dynamics of the Khumbu glacier (1 – the Everest top; 2 – visible part of the glacier in 2017, 3 – 1987, 4 – 1972, 5 – 1992 on the topographic map).

Background – the Landsat 8 space image 10.21.2017

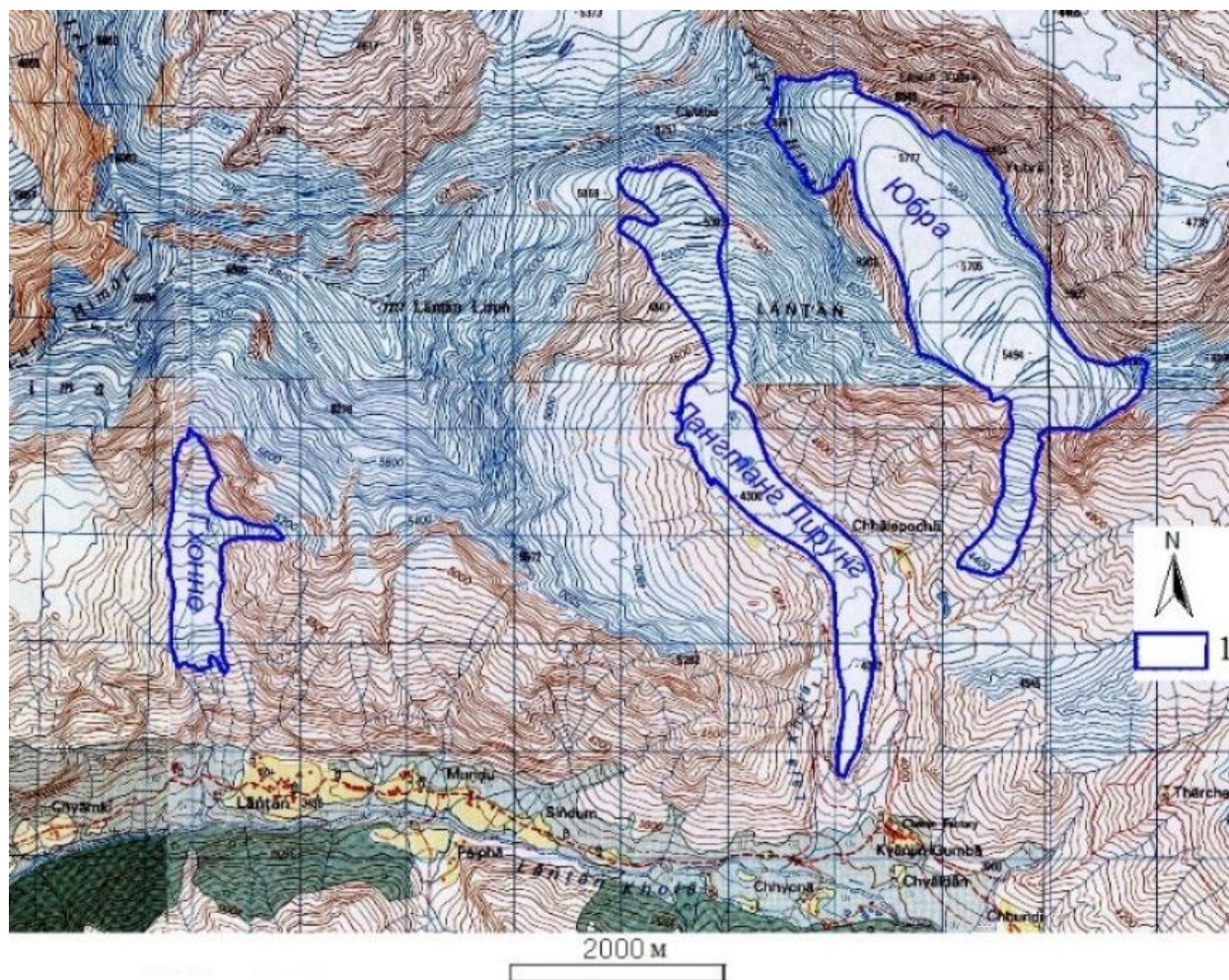


Рис. 3. Местность Лангтанг.

1 – границы ледников по топокарте

Fig. 3. District Langtang.

1 – borders of glaciers on topographic map

В местности Лангтанг (рис. 3), с главной вершиной Лангтанг Лирунг (Langtang Lirung, 7 227 м), рассмотрены три ледника: Лирунг (Langtang Lirung), Юбра (Yubra) и Гхонне (Ghonne). Последний представляет пульсирующий ледник и связан с разыгравшейся во время майского землетрясения 2015 года трагедией.

Использование данных Landsat для оценки динамики ледников Южной Сибири проблематично из-за погодных условий и отсутствия муссонной цикличности. Оптимальное время наблюдения (наименьшее количество сохранившегося снега) для хребта Кодар с середины июля по середину августа, да и то в любое время может выпасть снег, а из-за неустойчивости погоды часто вершины закрыты облаками. Для ледников Восточного Саяна оптимальное время примерно такое же или смещено дней на 10 позже (для района Мунку-Сардык) и на 15–20 (для Пика Топографов). Поэтому для исследования использовались данные каталогов ледников [Каталог, 1972; 1973], топографических карт 1950–60-х лет, имеющаяся аэросъёмка, съёмка со спутников высокого разрешения (специальный заказ), а также экспедиционные и литературные данные [Bajracharya, Mool, 2007; Shea et al., 2015; Stepanova et al., 2015; Osipov, Osipova, 2015]. Использовалась также авторская информация электронных баз данных (БД) [Китов, Плюснин, 2008; Kitov, Plyusnin, 2017]. Ледники названных территорий исследуются с середины прошлого столетия. Наибольший период наблюдения – у ледников Перетолчина и Радде [Перетолчин, 1908; Kitov et al., 2009].

Согласно составленной БД [Kitov, Pliusnin, 2017] состояние ледников оценивается в основном для 3-х периодов: 1950-е по топографическим картам; 1970-е по каталогам ледников; современное состояние по космоснимкам и экспедиционным данным. В районе хребта Кодар рассматривается наиболее изученный ледник Азаровой (№ 20) (рис. 4).

В Восточном Саяне представлены ледники горного массива Мунку-Сардык – ледник Перетолчина (рис. 5 А) и ледник пика Топографов (№ 18) (рис. 5 Б).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 приведены некоторые характеристики ледника по анализу данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ) и картографического материала.

Аналогичный тип пространственных данных использован для анализа остальных ледников; дата съёмки представлена как год-месяц-число (ГГГММЧЧ).

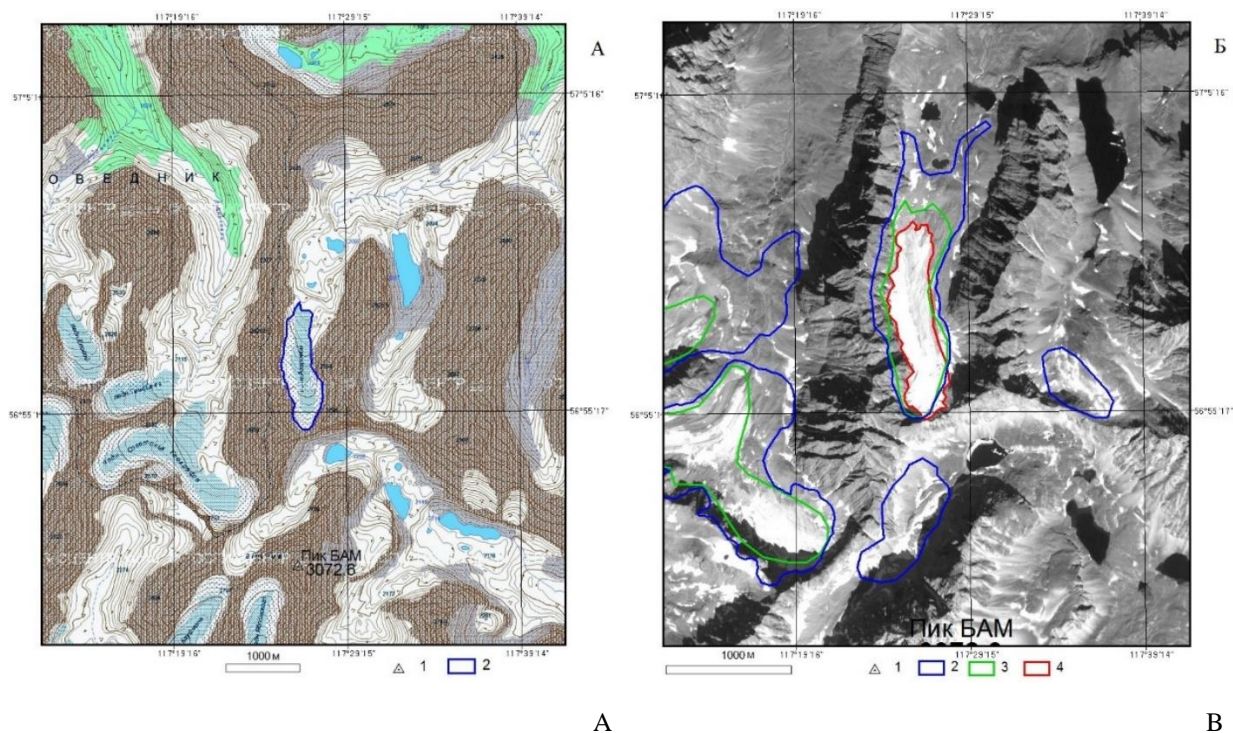


Рис. 4. Ледник Азаровой на топокарте ГосГисЦентра (ГГЦ) (А), обновлённой ГГЦ в 2003 году:

1 – вершины (пик БАМ, 3 072 м); 2 – границы ледника.

Динамика ледника Азаровой (Б): 1 – вершины; 2 – ледник по топокарте 1960-х годов;

3 – по карте ледников 1976 года, на основе аэросъёмки [Пластинин, 1998];

4 – современное состояние. Фон – космоснимок Aster, 14.08.2009

Fig. 4. The Azarova glacier on topographic map State GisCenter (SGC) (A), updated SGC in 2003:

1 – tops (BAM peak, 3 072); 2 – glacier borders.

Dynamics of the Azarova glacier (B): 1 – tops; 2 – the glacier by topographic map 1960s;

3 – by the glaciers map 1976, on the basis of aerial photograph [Plastinin, 1998];

4 – a current state. The background – space image Aster, 14. 08.2009

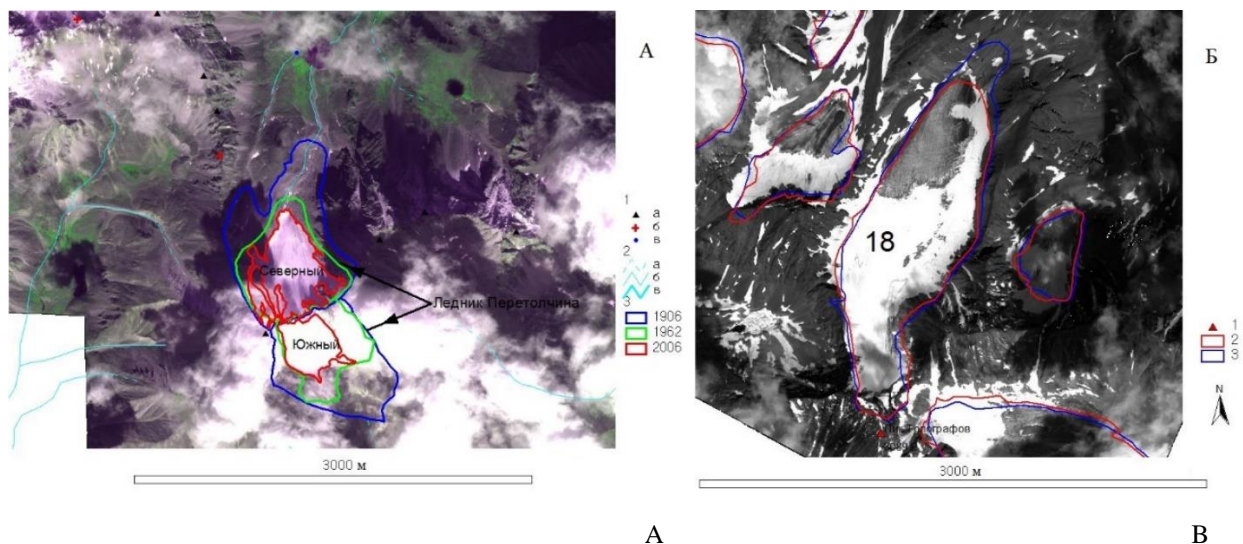


Рис. 5. Восточный Саян: А. Горный массив Мунку-Сардык, ледник Перетолчина:

1 – высотные отметки (а – вершины (Мунку-Сардык, 3 491 м); б – перевалы; в – урезы воды); 2 – реки;

3 – границы ледника соответственно в 1906 (по реконструкции схемы Перетолчина), 1962 (по топокарте), 2006 годах (по космоснимку).

Фон – космоснимок QuickBird 29.08.2006.

Б. Окинский хребет, ледник Топографов (№ 18): 1 – Пик Топографов, 3 089 м; 2 – граница ледника 2010 года (по космоснимку Landsat 7); 3 – граница ледника 1960 года (по топокарте). Фон – космоснимок WorldView 1, 17.07.2008

Fig. 5. East Sayan mountains: A. The Munku-Sardyk massif, the Peretolchin glacier:

1 – high-rise marks (a – tops, Munku-Sardyk, 3 491 m; б – passes; в – water edges); 2 – rivers;

3 – glacier borders accordingly in 1906 (on reconstruction of the Peretolchin's scheme), 1962 (on topographic map),

2006 (on space image). Background – space image QuickBird 29.08.2006.

B. The Okinsky ridge, the Glacier of Topographers (№ 18): 1 – Peak of Topographers, 3 089 m; 2 – glacier border in 2010 (on space image Landsat 7); 3 – glacier border in 1960 (on topographic map).

Background – space image WorldView 1, 17.07.2008

Данные (каталог) Национального Информационного центра Снега и Льда (doi:<http://dx.doi.org/10.7265/N5/NSIDC-WGI-2012-02>; https://nsidc.org/data/glacier_inventory/search/glacier_inventory_query.pl, 11.02.2018) обновлены частично. Считается, что эти данные соответствуют 2012 году. Однако это не уточнённые данные, особенно для ледников Южной Сибири. У гималайских ледников общая площадь включает все притоки области питания. Например, для Кхумбу это практически оледенение всей одноимённой долины. В табл. 2 приведены характеристики по шейп-файлам из БД с корректировкой для исследуемой долинной части гималайских ледников.

На рис. 6 представлена динамика ледников (скорость изменения в год и абсолютные значения за периоды I–VII). Периоды I – начало наблюдения в 1950–60-е годы по каталогу или топокарте; II – 1970-е годы, начало космосъёмки; III – 1980–90-е годы; IV – начало 2000-х годов; V – 2014 год; VI – 2015 год; VII – 2016–2017 годы.

Табл. 1. Динамика ледника Кхумбу
Table 1. The dynamics of glaciers Khumbu

Вид данных	Дата съёмки	Год	Площадь, км ²	Периметр, км	Длина, км
Топокарта	1992–96	1992	9,3	26,4	10,8
Мозаика ДДЗЗ	1980–90	1988	10,2	26,4	11,1
Каталог	1950–60	1950	13,5	27,7	11,9
Ландсат 1	14.12.1972	1972	10,4	26,9	11,1
Ландсат 4	22.12.1987	1987	4,4	14,0	6,3
Ландсат 5	09.11.1989	1989	1,6	11,2	3,7
Ландсат 5	17.11.1992	1992	1,7	11,4	3,6
Ландсат 5	28.11.1996	1996	1,5	10,8	3,5
Ландсат 7	30.10.2000	2000	1,5	10,4	4,0
Ландсат 7	20.10.2002	2002	1,6	10,6	4,1
Ландсат 7	05.11.2005	2005	1,4	9,0	3,3
Ландсат 7	26.10.2010	2010	1,5	10,0	3,8
Ландсат 8	10.10.2013	2013	1,5	9,1	3,4
Ландсат 8	06.11.2014	2014	3,7	12,7	5,5
Ландсат 8	30.10.2015	2015	1,3	9,9	3,1
Ландсат 8	21.10.2017	2017	1,2	8,2	2,7

Размеры сибирских ледников по масштабу несопоставимы с гималайскими, поэтому показаны отдельно. Первая точка (I) виртуальная (принята за ноль), но в периоде II (1960–70-е) все ледники резко сокращаются. В периоде III (1980–90-е) скорость сокращения ледника Кхумбу увеличивается. У ледников Азаровой и Кхумбу стабилизация наблюдается только к V периоду (характер изменения площади у этих ледников схожий). В IV периоде (начало 2000-х) Восточно-Саянские ледники сильнее деградируют. Не в такой степени, но ледники местности Лангтанг также сокращаются сильнее. В V периоде (2014) все ледники стабилизировались (даже положительное приращение у ледников Кхумбу и Азаровой), только ледник Перетолчина продолжает убывать, но медленно. Визуальная оценка данных в Google Earth и Landsat показывает увеличенную заснеженность в Гималаях. К сожалению, не удалось найти данные метеостанций за анализируемые годы для Гималаев (данные моделирования на сетке $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ пригодны для глобального анализа климата и не учитывают локальные условия). Однако по метеостанции Монды (Восточный Саян) в 2013–2014 годах были ливневые зимние осадки, что увеличило сумму годовых осадков в 2–3 раза по сравнению с типичным значением. В VI периоде (2015) резко увеличилась скорость сокращения. Вероятно, в Гималаях это из-за происшедшего землетрясения, длившегося с мая почти до конца 2015 года. По данным метеостанции Монды, в 2014 году наблюдалось понижение среднегодовой температуры, а к настоящему времени отмечается её повышение. По данным нашей термографии (термохроны у ледника Перетолчина устанавливаются с 2009 года) было резкое повышение зимних температур в 2013 году, а в 2014 – такое же понижение. К настоящему времени они незначительно повышаются; летние температуры с 2016 года начали снижаться. В VII периоде (современном, 2017) наблюдается стабилизация ледников. Динамика ледников в характерные годы представлена в табл. 2. Скорость изменения

площади и длины в год вычисляется как изменение соответствующей характеристики (в км² или км) в данном периоде, делённое на число лет в этом периоде.

По данным космосъёмки хорошо фиксируется открытая часть ледника. В основном в данном исследовании оценивались эти характеристики. Конечный участок у ледника Кхумбу начинает фрагментироваться; эти фрагменты также учитывались. Они представляют собой группы сераков (светлые пятна) на мокром льду (поэтому эти участки на космоснимке тёмные). Выделяют также активную часть ледника, простирающуюся значительно дальше открытой части до большого правого притока (ледник Лобуче). Она стабильно дешифрируется на снимках разных лет и практически не сокращается (рис. 2 б, розовая линия). Подобные участки есть и у малых Сибирских ледников. Они маркируются фрагментами многолетних снежников вдоль оси ледника. Далее идёт участок льда, вероятно мёртвого, до конечной морены, при протаивании которого образуются ледниковые озёра. Образование ледниковых озёр в стадии потепления является характерным признаком отступления ледников [Vajracharya, Mool, 2009].

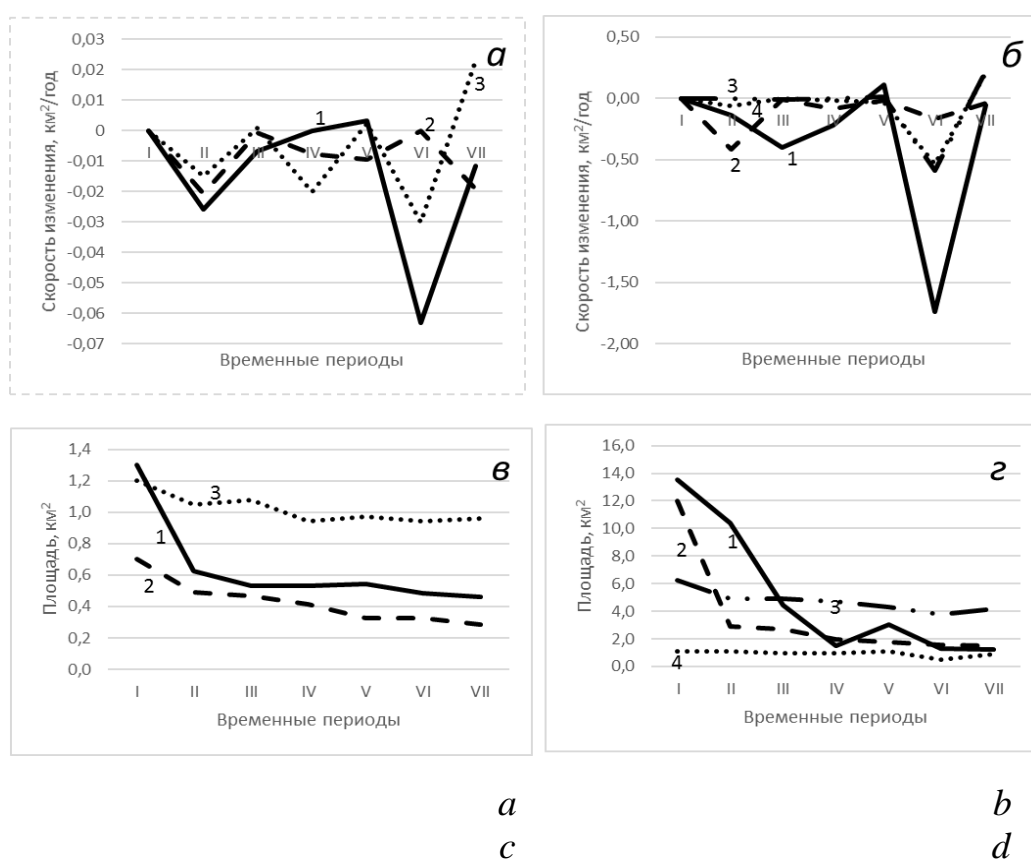


Рис. 6. Динамика ледников (км²):
a, б – скорость изменения площади ледников соответственно в Восточной Сибири и Гималаях
 (*a*: 1 – Азаровой, 2 – Перетолчина, 3 – Топографов Сибири;
б: 1 – Кхумбу, 2 – Лирунг, 3 – Юбра, 4 – Гхонне);
в, г – абсолютные изменения площади ледников (*a, б*) с 1950 по 2017 годы

Fig. 6. The dynamics of glaciers (km²):
a, b – the speed of change of glacier area respectively in Eastern Siberia and the Himalayas
 (*a*: glaciers: 1 – Azarova, 2 – Peretolchin, 3 – of Topografers;
b: 1 – Khumbu, 2 – Lirung, 3 – Yubra, 4 – Ghonne);
 the absolute change of area of glaciers (*a, b*) from 1950 to 2017

Табл. 2. Сравнительные характеристики ледников
Table 2. Comparative characteristics of glaciers

Год	Площадь, км ²	Длина, км	Период, лет	Изменение площади, км ²	Изменение длины, км	Скорость изменения площади	Скорость изменения длины
Ледник Азаровой (Кодар)							
1960	26,5	1,56	0	0	0	0	0
1972	18,8	1,21	12	-7,7	-0,4	-0,640	-0,029
1985	13,16	1,14	13	-5,6	-0,1	-0,434	-0,005
2015	8,97	0,89	30	-4,2	-0,2	-0,140	-0,008
Ледник Кхумбу (Гималаи)							
1950	13,51	11,88	0	0	0	0	0
1972	10,42	11,09	22	-3,1	-0,8	-0,140	-0,036
1987	4,43182	6,33	15	-6,0	-4,8	-0,399	-0,317
2015	1,32607	3,11	28	-3,1	-3,2	-0,111	-0,115
Ледник Топографов (Восточный Саян, Окинский хребет)							
1950	1,2	2,5	0	0	0	0	0
1960	1,042	2,32	10	-0,2	-0,2	-0,016	-0,018
2010	0,944	2,038	50	-0,1	-0,3	-0,002	-0,006
2016	0,963	2,06	6	0,1	0,02	0,003	0,004
Ледник Перетолчина (Восточный Саян, хребет Мунку-Сардык)							
1950	0,7	1,1	0	0	0	0	0
1960	0,493	1,01	10	-0,2	-0,1	-0,021	-0,009
2000	0,397	0,94	40	-0,1	-0,1	-0,002	-0,002
2017	0,288	0,81	17	-0,1	-0,1	-0,006	-0,008
Ледник Гхонне (Гималаи, Лангтанг)							
1950	1,103	2,300	0	0	0	0	0
1972	1,125	2,289	22	0,022	-0,011	0,001	-0,001
1988	0,970	2,260	16	-0,155	-0,029	-0,010	-0,002
2017	0,931	2,343	29	-0,039	0,083	-0,001	0,003
Ледник Лирунг (Гималаи, Лангтанг)							
1950	12,020	7,300	0	0	0	0	0
1972	2,938	4,957	22	-9,082	-2,343	-0,413	0,258
1992	2,726	6,437	20	-0,212	1,480	-0,011	-6,984
2017	1,503	3,509	25	-1,223	-2,928	-0,049	2,394
Ледник Юбра (Гималаи, Лангтанг)							
1950	6,250	6,000	0	0	0	0	0
1972	4,941	5,627	22	-1,309	-0,373	-0,059	0,285
1992	4,909	5,639	20	-0,033	0,013	-0,002	-0,391
2017	4,203	5,343	25	-0,706	-0,297	-0,028	0,421

Наблюдается также дробление ледников. Такое увеличение числа ледников отмечается в Восточном Саяне [Осипов и др., 2017]. С середины прошлого века ледник Перетолчина разделился на северную и южную части из перемётного, а с 2012 года у него фактически отделился западный край, питавший ранее его второй язык. Более интенсивно ледники бронируются поверхностными моренами [Коваленко, 2011; Котляков и др., 2015; Китов, Плюснин, 2008], из-за чего отмечается более резкое сокращение открытой части.

В Гималаях с 2010 года и особенно к 2014-му и зимой 2015 года перед весенним землетрясением 5 мая 2015 года дешифрировалось увеличение накопления снега и ледяных масс. Землетрясение спровоцировало сёржи ледников и массовый сход лавин. Из северной зоны питания с верхней части хребта через сформировавшийся с 1990-х годов каменный глетчер сошли лавины на базовый лагерь Эвереста. В национальном парке Лангтанг на деревню Лангтанг сошла нижняя часть языка ледника Гхонне, принёсшая наибольшую трагедию Непалу.

Землетрясение произошло около обеда (11:30), когда в деревне обычно туристы остаются на обед, а местные жители заняты их обеспечением. Восточная часть деревни (около трети), которая была на возвышенности, не пострадала. Наибольшее количество жертв и разрушений, совершённых потоком камней, отброшенных основной массой сошедшего льда вдоль русла речки и стока с ледника, произошло в центральной части (рис. 7). Западная часть, находящаяся в русле реки, оказалась полностью засыпанной смесью льда и камней. По площади это примерно треть, но по населению – незначительная часть. Всего погибло 250 человек; из них 175 – непальцы, остальные туристы из разных стран, а также молодая пара дипломатов из России. На краю деревни выстроена ступа и мемориальный комплекс со списком погибших и указанием их родины. Эта деревня была одним из значимых поселений на треке – там находились чек-пост национального парка, военный пост, почта.

На снимках из Интернета прошлых лет хорошо просматривается конус выноса, поросший кустарником. Это говорит о периодическом сходе ледника. Язык ледника сильно вытянут, а по его краям текут речные потоки, питающиеся со склонов цирка. Один из потоков по диагонали пересекает этот язык в месте, где есть перегиб из пологой части в крутую, обрывающуюся к террасе основной долины. На космоснимках видно, что в зоне питания ледника со склонов цирка сошли лавины, которые наехали и пододвинули верхнюю часть языка. Эта сдвигка спровоцировала отрыв его конца на перегибе. В последние годы (лет 15–20) с увеличением потока туристов деревня стала разрастаться в западном направлении; в самом русле у реки рядом с подвесным мостом также была гостиница. Это место полностью засыпано ледово-обломочным материалом по примерным оценкам толщиной около 200 м. Через два года вдоль русла произошло протаивание и оседание льда на 100–150 м (рис. 7 Г, Д). Во время схода льда ударной волной на другом берегу главной реки Лангтанг-Кхола сломало деревья.

По грубым оценкам по космоснимкам Landsat, площадь конуса выноса на террасу составила $0,53 \text{ км}^2$ (рис. 7), примерно длиной 850 м и общей шириной 700 м (на рис. 7 А–В выделено красным контуром). Восточная часть ($0,23 \text{ км}^2$) разрушила край деревни на возвышенном месте и не представляла основной поток, хотя и принесла наибольшие разрушения и жертвы. Западная половина ($0,28 \text{ км}^2$) лежит в долине речного стока с ледника (вероятно, лёд и обломочный материал ещё сильнее углубил овраг) и представляет собой толщу льда более 100 м. Несколько усадеб оказались погребёнными полностью гравийно-ледовой смесью, по нашим оценкам, объёмом $0,03\text{--}0,05 \text{ км}^3$. В нижней долинной части ледника Лангтанг-Лирунг, стекающего с той же главной вершины (7 227 м), что и Гхонне, но с другого склона, образовалось большое ледниковое озеро, отсутствовавшее в конце 1970-х годов. По данным космосъёмки, оно начало формироваться с 2000 года и увеличилось с 9 000 до $50\,000 \text{ м}^2$. Сейчас оно является резервуаром деривационной ГЭС в поселке Кянжин Гумба, обеспечивающей электричеством деревни верхней труднодоступной части долины. В каталоге WGI площадь этого ледника, вероятнее всего цирка, составляет $12,02 \text{ км}^2$, по топокарте площадь только долинной части – $1,7 \text{ км}^2$, по космоснимкам 1988 года – $2,1 \text{ км}^2$, 2001 года – $1,99 \text{ км}^2$, 2014 года – $1,7 \text{ км}^2$, 2015 года (после землетрясения) – $1,58 \text{ км}^2$, в настоящее время (2017 год) – $1,5 \text{ км}^2$. А длина с 1988 года сократилась с 4,5 до 3,5 км.

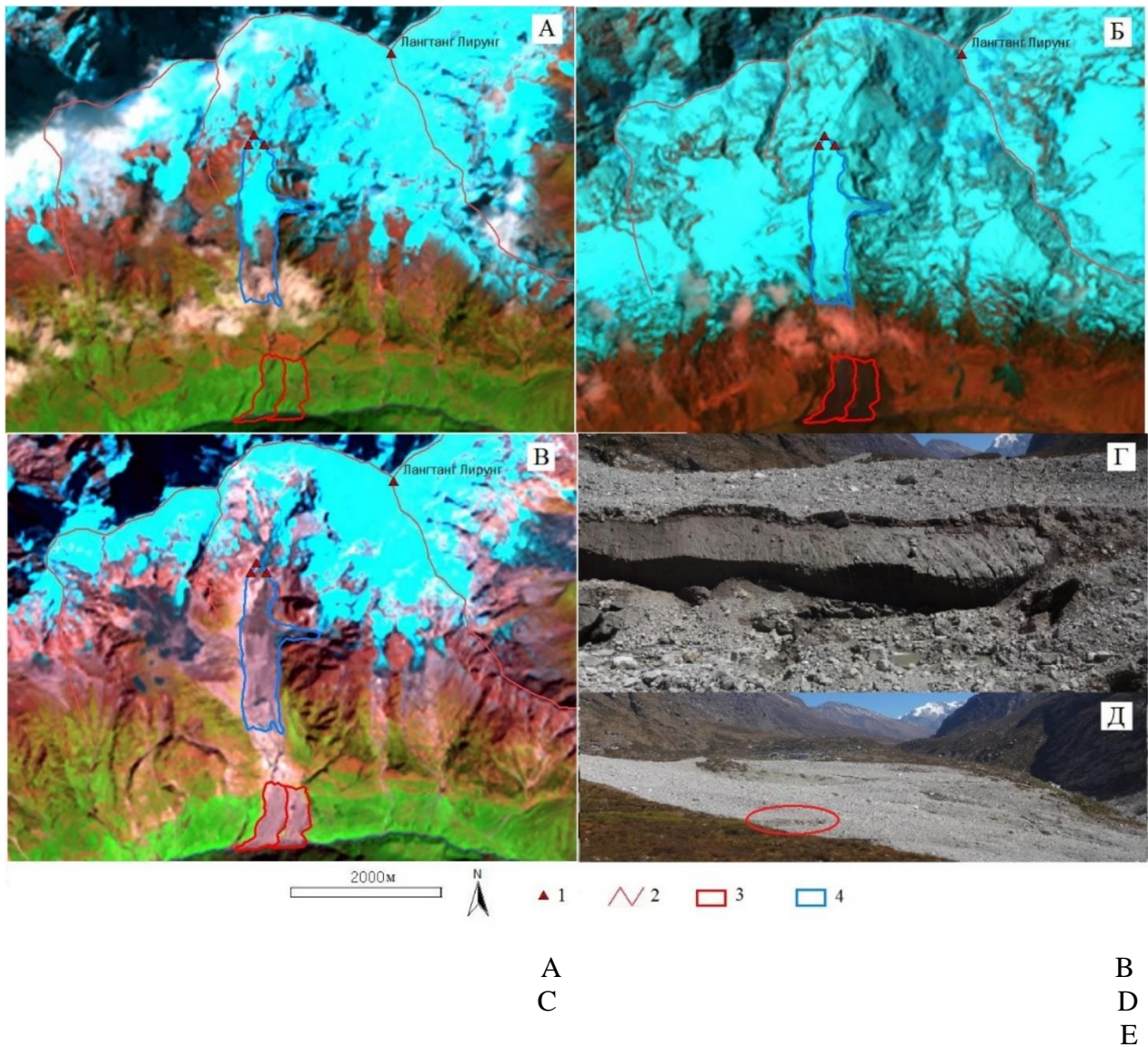


Рис. 7. Ледник Гхонне на космоснимке Landsat 8:
 А – 4 октября 2014 года; Б – 30 апреля 2015 года (за неделю до катастрофы);
 В – 7 октября 2015 года (спустя 6 месяцев после схода ледника);
 Г – октябрь 2017 года (осевшая часть выноса лавины вдоль русла реки ледника);
 Д – общий вид ледникового выноса (овалом отмечен фрагмент Г)
 Fig. 7. Ghonne Glacier on Landsat 8 space image:
 А – 4 October, 2014; В – 30 April, 2015 (a week before the disaster);
 С – 7 October, 2015 (6 months after the fall of the glacier);
 D – October, 2017 (buried portion of the stem of an avalanche along the glacier river bed);
 E – general view of the cone of carrying out of glacier (fragment D is marked by oval)

ВЫВОДЫ

Как и в южной Сибири, в Гималаях наблюдается сокращение ледников, которое происходит неравномерно. Динамика изменения ледников во всех районах схожа, хотя малые ледники в Гималаях сокращаются интенсивнее, а ледники Южной Сибири имеют меньшие темпы сокращения. Замечены схожие тенденции изменения ледника Азаровой в Кодаре и ледника Кхумбу; это требует дальнейшего наблюдения. Особую опасность с увеличением туристического потока и хозяйственной деятельности местного населения представляют пульсирующие ледники Гималаев, поведение которых непредсказуемо. Так же, как и после

схода ледника Колки, даже при общем сокращении ледников у этих ледников отмечается повышенное накопление ледяной массы. Хотя у ледников есть свои особенности, но просматриваются общие тенденции – если в середине прошлого столетия цикл сокращения-стабилизации ледников составлял 40–50 лет, то в последние годы наблюдается неустойчивость в поведении ледников (нарушения циклов до 2–5 лет). Средняя скорость изменения площади рассматриваемых семи ледников в начале 1970-х годов составляла $-0,176 \text{ км}^2/\text{год}$, к началу 2000-х она замедляется до $-0,123$, а к настоящему времени – до $+0,047$. Однако у ледников Гхоне, Лирунг и особенно Перетолчина она увеличивается.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено по программе фундаментальных научных исследований «Геоинформационное картографирование и математическое моделирование географической среды в условиях глобализации и воздействия на природные и социально-экономические процессы в Сибири и на сопредельных территориях» и при поддержке гранта РФФИ № 17-05-0040 «Динамика горных геосистем Байкальской территории под воздействием природных и антропогенных факторов».

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was performed under the program of fundamental scientific research “Geoinformation mapping and mathematical modelling of geographical environment in conditions of globalization and impact on the natural and socio-economic processes in Siberia and adjacent territories” and supported by the grant of RFBR No 17-05-0040 “Dynamics of mountain geosystems of the Baikal territory under the influence of natural and anthropogenic factors”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каталог ледников СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1973. Т. 16. Вып. 1. Ч. 3–5. Вып. 2. Ч. 1. 64 с.
2. Каталог ледников СССР. Л.: Гидрометиздат, 1972. Т. 17. Вып. 2. Ч. 1. 44 с.
3. Китов А.Д., Плюснин В.М. Особенности локальных гляциологических явлений в горных ландшафтах (на примере Байкало-Урумчинского трансекта). ИнтерКарто. ИнтерГИС. Материалы междунар. конф. Саратов, 24–26 июня, Урумчи, 29 июня – 1 июля 2008 г. Саратов: Международная картографическая ассоциация, 2008. Т. 14, Ч. 1. С. 130–137.
4. Коваленко Н.В. Режим и эволюция малых форм оледенения. М.: МАКС Пресс, 2011. 240 с.
5. Котляков В.М., Хромова Т.Е., Носенко Г.А., Попова В.В., Чернова Л.П., Муравьев А.Я., Рототаева О.В., Никитин С.А., Зверкова Н.М. Современные изменения ледников горных районов России. М.: Товарищество научных изданий «КМК», 2015. 288 с.
6. Котляков В.М., Чернова Л.П., Муравьев А.Я., Хромова Т.Е., Зверкова Н.М. Изменение горных ледников в Северном и Южном полушариях за последние 160 лет. Лёд и Снег, 2017. Т. 57. № 4. С. 453–467. DOI: 10.15356/2076-6734-2017-4-453-467.
7. Осипов Э.Ю., Осипова О.П., Клевцов Е.В. Инвентаризация ледников Восточного Саяна по материалам космических съёмки. Лёд и Снег, 2017. Т. 57. № 4. С. 483–497. DOI: 10.15356/2076-6734-2017-4-483-497.
8. Перетолчин С.П. Ледники хребта Мунку-Сардык. Известия Томского технического института. Томск: Типолиитография Сиб. товарищества печатного дела, 1908. Т. 9. 60 с.
9. 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-во ИрГТУ, 1998. 142 с.
10. Bajracharya S.R., Mool P. Glaciers, glacial lakes and glacial lake outburst floods in the Mount Everest region, Nepal. Annals of Glaciology, 2007. V. 50. No 53. P. 81–86.

11. Higuchi K., Watanabe O., Fushimi H., Takenaka S., Nagoshi A. Glaciers of Asia – Glaciers of Nepal – Glacier Distribution in the Nepal Himalaya with comparisons to the Karakoram Range. Satellite image atlas of glaciers of the World. U.S. Geological Survey Professional Paper 1386–F–6, 2015. P. 293–320. Электронный ресурс: <https://pubs.usgs.gov/pp/p1386f/> (дата обращения 01.08.2018).
12. IPCC. Climate Change 2007. The physical science basis. Contribution of Working Group 1 to the Fourth assessment report of the Intergovernmental panel on climate change. Ed. by S. Solomon, D. Qin, M. Manning et al. Cambridge, N.Y.: Intergovern. panel on climate change, 2007. 996 p.
13. Kitov A.D., Kovalenko S.N., Plyusnin V.M. The results of 100-year-long observations of the glacial geosystem dynamics in the Munku-Sardyk massif. Geography and Natural Resources, 2009. V. 30. No 3. P. 272–278. DOI: 10.1016/j.gnr.2009.09.012.
14. Kitov A.D., Plyusnin V.M. The database and GIS analysis of the status of glaciation of the Kodar Mountains (Northern Transbaikalia). Geography and Natural Resources, 2017. V. 38. No 2. P. 181–187. DOI: 10.1134/S1875372817020093.
15. Osipov E.Y., Osipova O.P. Glaciers of the Levaya Sygykta River watershed, Kodar Ridge, southeastern Siberia, Russia: modern morphology, climate conditions and changes over the past decades. Environment Earth Sciences, 2015. V. 74. No. 3. P. 1969–1984. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4352-4>.
16. Shea J.M., Immerzeel W.W., Wagnon P., Vincent C., Bajracharya S. Modelling glacier change in the Everest region, Nepal Himalaya. The Cryosphere, 2015. V. 9. P. 1105–1128. DOI: 10.5194/tc-9-1105-2015.
17. Stepanova O.G., Trunova V.A., Sidorina A.V., Zvereva V.V., Melgunov M.S., Petrovskii S.K., Krapivina S.M., Fedotov A.P., Rakshun Ya.V. Investigating bottom sediments from proglacial Lake Ehoy (Eastern Sayan Ridge) by means of SR-XRF. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics. Allerton Press, Inc., 2015. V. 79. No 1. P. 118–121. DOI: 10.3103/S1062873815010311.
18. Wagnon P., Vincent C., Arnaud Y., Berthier E., Vuillermo, E., Gruber S., Ménégoz M., Gilbert A., Dumont M., Shea J. M., Stumm D., Pokhrel B. K. Seasonal and annual mass balances of Mera and Pokalde glaciers (Nepal Himalaya) since 2007. The Cryosphere, 2007. V. 7. P. 1769–1786. DOI: 10.5194/tc-7-1769-2013.

REFERENCES

1. Bajracharya S.R., Mool P. Glaciers, glacial lakes and glacial lake outburst floods in the Mount Everest region, Nepal. Annals of Glaciology, 2007. V. 50. No 53. P. 81–86.
2. Higuchi K., Watanabe O., Fushimi H., Takenaka S., Nagoshi A. Glaciers of Asia – glaciers of Nepal – Glacier Distribution in the Nepal Himalaya with comparisons to the Karakoram Range. Satellite image atlas of glaciers of the World. U.S. Geological Survey Professional Paper 1386–F–6, 2015. P. 293–320. Web resource: <https://pubs.usgs.gov/pp/p1386f/> (accessed 01.08.2018).
3. IPCC. Climate Change 2007. The physical science basis. Contribution of Working Group 1 to the Fourth assessment report of the Intergovernmental panel on climate change. Ed. by S. Solomon, D. Qin, M. Manning et al. Cambridge, N.Y.: Intergovern. panel on climate change, 2007. 996 p.
4. Kitov A.D., Kovalenko S.N., Plyusnin V.M. The results of 100-year-long observations of the glacial geosystem dynamics in the Munku-Sardyk massif. Geography and natural resources, 2009. V. 30. No 3. P. 272–278. DOI: 10.1016/j.gnr.2009.09.012.
5. Kitov A.D., Plyusnin V.M. Features of local glaciological phenomena in mountainous landscapes (the example of the Baikal-Urumqi Transect). InterCarto. InterGIS. Proceedings of International conference. Saratov, June 24–26, Urumqi, June 29 – July 1, 2008. Saratov: International Cartographic Association, 2008. V. 14. P. 130–137 (in Russian, abs English).

6. *Kitov A.D., Plyusnin V.M.* The database and GIS analysis of the status of glaciation of the Kodar Mountains (Northern Transbaikalia). *Geography and Natural Resources*, 2017. V. 38. No 2. P. 181–187. DOI: 10.1134/S1875372817020093.
 7. *Kotlyakov V.M., Chernova L.P., Muravyov A.Ya., Khromova T.E., Zverkova N.M.* Changes of mountain glaciers in the Northern and Southern Hemispheres over the past 160 years. *Ice and Snow*, 2017. V. 57. No 4. P. 453–467. DOI: 10.15356/2076-6734-2017-4-453-467 (in Russian).
 8. *Kotlyakov V.M., Hromova T.E., Nosenko G.A., Popova V.V., Chernova L.P., Muravyov A.Ya., Rototaeva O.V., Nikitin S.A., Zverkova N.M.* Recent changes in the glaciers of mountain regions of Russia. Moscow: KMK Scientific Press Ltd., 2015. 288 p. (in Russian).
 9. *Kovalenko N.V.* Mode and the evolution of small forms of glaciation. Moscow: MAKS Press, 2011. 240 p. (in Russian).
 10. *Osipov E.Y., Osipova O.P.* Glaciers of the Levaya Sygykta River watershed, Kodar Ridge, southeastern Siberia, Russia: modern morphology, climate conditions and changes over the past decades. *Environment Earth Sciences*, 2015. V. 74. No 3. P. 1969–1984. DOI: 10.1007/s12665-015-4352-4.
 11. *Osipov E.Y., Osipova O.P., Klevtsov E.V.* Inventory of glaciers in the Eastern Sayan on the basis of space surveys. *Ice and Snow*, 2017. V. 57. No 4. P. 483–497. DOI: 10.15356/2076-6734-2017-4-483-497 (in Russian).
 12. *Peretolchin S.P.* Glaciers of the Munku-Sardyk Range. News of Tomsk Technical Institute. Tomsk: Typolithography of the Siberian printing partnership, 1908. V. 9. 60 p. (in Russian).
 13. *Plastinin L.A.* Remotely-mapping study of nival-glacial complexes mountain regions of Siberia (the morphology and dynamics of glaciers, snow and ice of the Kodar ridge in the Trans-Baikal region). Irkutsk: IrSTU Publishing house, 1998. 142 p. (in Russian).
 14. *Shea J.M., Immerzeel W.W., Wagnon P., Vincent C., Bajracharya S.* Modelling glacier change in the Everest region, Nepal Himalaya. *The Cryosphere*, 2015. V. 9. P. 1105–1128. DOI:10.5194/tc-9-1105-2015.
 15. *Stepanova O.G., Trunova V.A., Sidorina A.V., Zvereva V.V., Melgunov M.S., Petrovskii S.K., Krapivina S.M., Fedotov A.P., Rakshun Ya.V.* Investigating bottom sediments from proglacial Lake Ehoy (Eastern Sayan Ridge) by means of SR-XRF. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics*. Allerton Press, Inc., 2015. V. 79. No 1. P. 118–121. DOI: 10.3103/S1062873815010311.
 16. USSR Glacier Inventory. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1973. V. 16. Iss. 1. Part 3–5. Iss. 2. Part 1. 37 p. (in Russian).
 17. USSR Glacier Inventory. Leningrad: Hydrometizdat, 1972. V. 17. Iss. 2. Part 1. 44 p. (in Russian).
 18. *Wagnon P., Vincent C., Arnaud Y., Berthier E., Vuillermo, E., Gruber S., Ménégoz M., Gilbert A., Dumont M., Shea J. M., Stumm D., Pokhrel B. K.* Seasonal and annual mass balances of Mera and Pokalde glaciers (Nepal Himalaya) since 2007. *The Cryosphere*, 2007. V. 7. P. 1769–1786. DOI: 10.5194/tc-7-1769-2013.
-