



УДК551.324(235.243) + 551.324(235.32)
DOI <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2019.29.68>

Сравнение динамики ледников в Гималаях и горах юга Восточной Сибири

А. Д. Китов

Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, г. Иркутск, Россия

В. М. Плюснин

*Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, г. Иркутск, Россия
Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия*

Аннотация. Исследованы скорости изменения длины и площади некоторых ледников Гималаев и ледников гор юга Восточной Сибири. Проведен сравнительный количественный анализ условий существования и морфологических параметров этих ледников. В последние три десятилетия глобальное потепление климата вызывает изменения в динамике горных ледников. Во всех рассматриваемых горных системах наблюдается дегляциация, вызванная глобальным потеплением, начавшимся в 1970–1980-е гг. Наибольшему сокращению подвергаются присклоновые ледники и ледники плоских вершин, в меньшей мере – каровые. Происходят морфологические изменения ледниковых форм, переметные ледники переходят в карово-долинные, каровые – в присклоновые. В целом формируется много нивально-гляциальных геосистем переходных форм – каменных глетчеров, многолетних снежников, наледей, озер. Рассмотрены климатические параметры, влияющие на динамику ледников. Если с увеличением летней температуры воздуха интенсивность таяния ледников возрастает, то изменения количества атмосферных осадков такой связи не образуют. 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, Aster, QuickBird, WorldView-1.

Ключевые слова: динамика ледников, горные ледники, космические снимки, ГИС, Восточный Саян, Гималаи.

Для цитирования: Китов А. Д., Плюснин В. М. Сравнение динамики ледников в Гималаях и горах юга Восточной Сибири // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2019. Т. 29. С. 68–84. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2019.29.68>

Введение

Отмечаемое в настоящее время потепление климата отражается на состоянии современного оледенения в различных горных районах. Сообщения о резком стаивании ледников в Гималаях к 2035 г. [IPCC, 2007] или о возможном их сокращении на 73–96 % к 2100 г. по результатам моделирования [Modelling glacier change ... , 2015] вызвали необходимость проверки этого прогноза. Наблюдающиеся в последние годы периоды усиления и ослабления глобального потепления вызывают не только стремительное отступление

концов ледников, но и их стационарность и даже увеличение размеров некоторых ледников в разных горных системах [Изменение горных ледников ... , 2017]. Кроме того, указывается, что малые ледники в районе Джомолунгмы реагируют интенсивнее на потепление, чем большие, реакция которых менее заметна [Seasonal and annual ... , 2007].

Наши дендрохронологические исследования [Suvorov, Kitov, 2017] и анализ озерных отложений [Investigating Bottom Sediments ... , 2015] в районе массива Мунку-Сардык выявляют периоды с повышенным приростом деревьев и скоростью осадконакопления в 1900–1965 и 1983–2000 гг., согласуемые с отступанием ледника Перетолчина. Замедление роста деревьев и снижение скорости осадконакопления в 1965–1980 гг. связываем с увеличением размеров ледника. С 2000 по 2013 г. наблюдается уменьшение прироста деревьев в связи с понижением летних температур.

Выявление закономерностей динамики гляциальных геосистем, их связь с климатическими изменениями в разных горных системах представляет самостоятельный научный интерес. В данном исследовании рассматривается изменение некоторых ледников в Гималаях (в районе Джомолунгмы) в сравнении с малыми ледниками в Кодарском хребте и Восточном Саяне (массив Мунку-Сардык и пик Топографов) (рис. 1).



Рис. 1. Исследуемые территории

- 1 – ледниковые системы: А – хребет Кодар, Б – Восточный Саян, В – Гималаи;
 2 – линии координатной сетки; 3 – реки; 4 – моря и озера; 5 – крупные города;
 6 – границы государств

Всего рассматриваются семь ледников: три – на юге Восточной Сибири и четыре – в центральной части Гималаев на территории Непала. Сибирские ледники небольшие, каровые. Гималайские ледники преимущественно долинные, имеют сложную структуру, обширную зону питания с множеством притоков. В данной работе они представлены только своей долинной частью без притоков – от области питания и формирования основного потока до конечных морен.

Ледник Кхумбу (№ 133), берущий начало с южного склона г. Джомолунгмы, наиболее популярный у туристов и альпинистов. Его площадь с фирновым полем и притоками достигает 45 км², а долинная часть от уровня 5400 м охватывает 13 км². Ледник Гхонне (№ 6) – пример пульсирующего ледника. Здесь рассматривается его наиболее подвижная нижняя часть от узкого перешейка, отделяющая его от основной зоны питания. Ледник Лирунг (№ 7) исследуется нами без зоны питания, примерно от уровня 5400 м. В указанный период демонстрирует заметную деградацию с образованием в нижней части ледникового озера. Ледник Юбра (№ 8) – карово-долинный, изучается полностью в границах цирка с зоной питания. Хотя по размерам он больше сибирских ледников, но сопоставим с ними как моноледник, не имеющий притоков.

В горах юга Восточной Сибири рассматриваются карово-долинный ледник Азаровой (№ 20) в хр. Кодар, в Восточном Саяне – карово-долинный ледник № 18, один из крупных ледников у пика Топографов, и каровый ледник Перетолчина (№ 31), самый крупный в горном массиве Мунку-Сардык, испытывающий в настоящее время наибольшую деградацию.

Во внимание берутся семь временных периодов: 1-й – 1950-е гг., для сибирских ледников это в основном данные каталога СССР [Каталог, 1972, Каталог, 1973]; 2-й – 1960–1970-е гг., ледники, отображенные на топографических картах этого времени, для ледника Азаровой выполнена специальная фототеодолитная съемка одним из авторов [Плюснин, 2007]; 3-й – 1980–1990-е гг., данные по космическим снимкам Landsat-5; 4-й – 2000–2009-е гг., данные по космическим снимкам Landsat-7; 5-й – 2014 г., данные по космическим снимкам Landsat-7, -8, обстановка перед землетрясением в Гималаях, произошедшем 5 мая 2015 г.; 6-й – 2015 г., обстановка после землетрясения и 7-й – 2017 г., обстановка в настоящее время.

Материалы и методы исследования

Использованы материалы полевых работ авторов, данные дистанционного зондирования Земли, картографические материалы и информация гляциологических баз данных – каталогов ледников: Глобальный каталог ледников (World glacier inventory – WGI) и Каталог ледников СССР (1972–1973 гг.). На сайте USGS доступны космические снимки Landsat с 1972 г. различного пространственного разрешения. Сканер MSS (Landsat-1, -2) имеет разрешение 60 м в четырех спектральных каналах, сканеры TM, ETM, LC (Landsat-5, -7, -8) – 30 м (15 м в панхроматическом канале) и больше спектральных каналов, что расширяет возможности RGB-синтеза. Соответственно, точность оценки площади и длины ледника зависит от этих параметров и

составляет около 10–15 % при сравнении характеристик ледников в разные временные интервалы.

Туристические карты исследуемых ледников для Непала оказались практически непригодными для точной привязки космоснимков, а полученные с доступных сайтов топографические карты в проекции модифицированной UTM и коэффициентом сжатия 0,9999 смещены по отношению к данным Landsat на 250 м.

С целью анализа изменения ледников с помощью программного обеспечения ГИС ArcView-3.2 создавались ГИС-проекты. Для территорий Гималаев использовались топографические карты и космические снимки Landsat в проекции UTM. Применялся в основном RGB-синтез 2–4–7 каналов для Landsat-7 и 3–5–7 – для Landsat-8. Данные совмещались, производилась их векторизация. Точность векторизации ранних снимков (Landsat-1, -2) меньше из-за меньшего пространственного (в 2 раза) и денситометрического разрешения данных, чем современных снимков (Landsat-7, -8).

Векторизация данных и оценка характеристик ледников для гор Южной Сибири более точны, так как использовались не только снимки Landsat, но и данные со спутников высокого разрешения – Aster, QuickBird, WorldView-1, а также проводилась GPS-метрия на местности. Данные совмещались на основе топографических карт в проекции Гаусса – Крюгера.

Территории исследований

Гималаи – высочайшая горная система земного шара, расположены в Азии, между Тибетским нагорьем на севере и Индо-Гангской равниной на юге. Название произошло от непальского «химал» – «снежная гора». Образуют огромную дугу длиной около 2500 км, шириной до 350 км. Средняя высота гребней – около 6000 м, высшая точка – г. Джомолунгма (Эверест) – 8848 м, 11 вершин поднимаются выше 8000 м. Гималаи состоят из нескольких параллельных горных цепей с крутым южным и сравнительно пологим северным склонами. Северной границей служит гигантская продольная депрессия, занятая верхним течением рек Инд и Брахмапутра, текущих в противоположных направлениях.

Общая площадь ледников в Гималаях составляет 33 200 км², а объём снега и льда в них – около 6 600 км³ [Коновалова, 1972]. Ледники расположены главным образом вокруг наиболее крупных горных массивов и самых высоких вершин. Наиболее протяжённые ледники – Ганготри (32 км) и Зема (31 км), а также Ронгбук (22,2 км), расположенный на северном склоне г. Джомолунгмы.

Талые ледниковые воды питают большие реки – Ганг, Инд и Брахмапутру и множество их притоков.

На западе Гималаев высота снеговой линии составляет примерно 5000 м на южных склонах и 5700–5900 м – на северных. На востоке Гималаев снеговая граница на южных склонах находится на высоте 4500–4800 м, а на северных – 6100 м. Ледники имеют преимущественно дендритовый (туркестанский) тип, они спускаются на 1300–1600 м ниже снеговой линии [Алексеева, 2007].

О климате Гималаев можно судить по условиям на Джомолунгме. В январе, самом холодном месяце, средняя температура составляет -36°C , иногда падая до -60°C . Даже в июле, самом тёплом месяце, средняя температура здесь составляет -19°C . Давление на вершине – всего 326 мбар, почти треть от давления на уровне моря. Зимой и весной преобладает западный ветер. Влажный воздух при соприкосновении с холодной вершиной конденсируется, образуя облако в виде флага, направленного на восток. По этому облаку альпинисты определяют скорость ветра на вершине: при скорости ветра 80 км/ч «флаг» горизонтален, выше – направлен вверх, ниже – вниз. Зимой юго-западный ветер может достигать 75 м/с. С июня по сентябрь приходят муссоны с Индийского океана, в это время выпадает большее количество осадков, а на вершинах господствуют снежные штормы.

Местность Кхумбу имеет важное хозяйственное значение, здесь сосредоточены основные туристские маршруты, в том числе к Джомолунгме. Из-за усилившегося таяния ледников увеличиваются в размерах ледниковые озера, кроме того, образуются новые, прорыв которых грозит наводнениями и селями [Вајгачагуа, Мool, 2009].

Количество осадков и средние максимальные и минимальные значения температуры на метеостанциях от Катманду в сторону Джомолунгмы представлены в табл. 1.

Таблица 1

Средние максимальные и минимальные температуры воздуха и количество осадков на метеостанциях к северу от Катманду

Месяц	Катманду. Абс. высота – 1336 м			Жири. Абс. высота – 1905 м			Намче Базар. Абс. высота – 3446 м			Тенгбоче. Абс. высота – 3867 м		
	t °C max	t °C min	осадки, мм	t °C max	t °C min	осад- ки, мм	t °C max	t °C min	осад- ки, мм	t °C max	t °C min	осад- ки, мм
Январь	19	2	18	13	0	18	7	-8	26	4	-9	13
Февр.	21	3	11	15	1	20	6	-6	23	5	-9	24
Март	25	7	33	19	4	47	9	-3	34	9	-6	23
Апрель	28	10	54	22	8	71	12	1	26	12	-4	25
Май	30	14	83	22	12	139	14	4	41	14	-1	29
Июнь	29	18	270	23	16	381	15	6	140	14	3	95
Июль	28	19	383	23	17	599	16	8	243	14	5	280
Август	28	19	338	23	17	605	16	8	243	14	4	265
Сен- тябрь	27	17	160	22	15	337	15	6	165	13	2	140
Октябрь	27	12	62	20	10	93	12	2	78	12	-2	72
Ноябрь	23	7	7	17	4	15	9	3	9	8	-7	9
Декабрь	20	2	2	14	1	3	7	-6	39	6	-7	2
Год	25,4	10,8	1421	19,4	8,7	2328	16,5	1,3	1067	10,4	-2,6	977

Горы Южной Сибири относятся к категории возрожденных. Они возникли в новейший неотектонический этап на месте денудационных равнин и плато. Восточный Саян представляет собой обширное сводово-глыбовое нагорье. Его наиболее высокая часть, где ряд вершин превышает 3000 м, расположена на юго-восточной окраине. Здесь преобладает альпинотипный и резкорасчлененный эрозионный тип рельефа. Оледенение Восточного Са-

яна включает более 100 ледников общей площадью около 30 км². Но лишь четыре ледника имеют площадь более 1 км². Выделяются два центра современного оледенения – горный узел с вершиной пик Топографов и массив Мунку-Сардык, в сумме дающие около 5 км² площади ледников.

Хребет Кодар представляет собой часть обширного и сложного по строению Станового нагорья. Основные черты рельефа обусловлены неотектоническими движениями. Большую роль в моделировке рельефа сыграли плейстоценовые оледенения, создавшие в центральной, наиболее поднятой части хребта альпинотипный рельеф. В настоящее время на Кодаре имеются 39 ледников общей площадью 19 км² [South of East Siberia ... , 2013]. На деградирующие, слабоподвижные ледники со склонов поступает большое количество обломочного материала, который бронирует поверхность ледников и постепенно превращает их в каменные глетчеры. Все ледники в Сибири расположены ниже теоретической снеговой линии, находятся в зоне сплошного или прерывистого распространения мерзлоты и большей частью лежат на промороженном ложе. В целом соотношение летней высокой температуры воздуха и осадков на территории Сибири, выпадающих в основном в летнее время, не благоприятствует существованию современного оледенения. Однако ледники существуют, и благодаря усилению некоторых локальных факторов, таких как метелевый перенос снега, расчлененность горных хребтов, сильное промерзание горных пород в зимнее время, они вполне устойчивы к изменениям климата. Всего в Сибири насчитывается около 1500 горных ледников общей площадью 878 км².

Максимальный рост глобальной температуры в последнее столетие (до 2,5 °С) отмечен на юге Сибири, в Забайкалье и Приморье [IPCC, 2013]. Но за последние 30 лет этот рост усилился, что особенно резко выражено над континентальными районами Евразии (0,2–0,5 °С / 10 лет). В настоящее время климатические условия на территории Сибири существенно меняются: повышается температура холодных сезонов года, растёт испаряемость при сохранении и даже снижении количества атмосферных осадков за тёплый период года, возрастает повторяемость засух, изменяется годовой сток рек и его сезонное перераспределение. В годовом цикле особенно потеплели зима и весна.

Результаты исследования

Ледник Кхумбу, один из самых крупных в Непале, берет начало на юго-западном склоне Джомолунгмы (Эвереста), в котловине, называемой альпинистами Долиной Молчания (рис. 2). Она вытянута в северо-западном направлении на 7 км при средней ширине 2 км. В устье котловины ледник переходит в ледопад высотой 700–800 м и на протяжении почти 5 км разбит трещинами на крупные блоки, постоянно изменяющиеся и представляющие наибольшую трудность при прохождении для покорителей Джомолунгмы. Далее ледник круто поворачивает на юго-запад, принимает справа несколько крупных ледниковых притоков и оканчивается в настоящее время на высоте 4900 м [Glaciers of Asia ... , 2015].



Рис. 2. Ледник Кхумбу на космическом снимке Landsat-7

Фирновая линия на леднике проходит на высоте 5800 м. Тело ледника после ледопада покрыто обломочным материалом, боковые морены возвышаются над растаявшим с поверхности льдом (рис. 3), формируются валы и гряды обломочных отложений, а в местах протаивания – ледниковые озера.



Рис. 3. Ледник Кхумбу, покрытый моренными отложениями

Местность Лангтанг Лирунг находится к северу от Катманду. Здесь расположен национальный парк Лангтанг, занимающий площадь 170,9 тыс. га, имеющий важное рекреационное значение для страны. Именно здесь находился эпицентр землетрясения 5 мая 2015 г., вызвавший сдвиги ледников, которые привели к природным катастрофам.

С горного массива высотами вершин 6–7 тыс. м на юг спускаются три ледника, анализируемые нами. Самый восточный – ледник Юбра, оканчивается языком-ледопадом в двух километрах от пос. Кянжин Гумба (рис. 4). К этому же поселку подходит ледник Лирунг, в нижней части которого образовалось ледниковое озеро, являющееся резервуаром для деривационной ГЭС.



Рис. 4. Ледники национального парка Лангтанг

С западной стороны главной вершины (7227 м) спускается ледник Гхонне. Нами рассматривается только его нижняя, пульсирующая часть. В этой долине на высоте 4200–4680 м сформировался более пологий участок, способствующий накоплению льда, ниже расположен крутой скальный участок, обрывающийся до 3500 м, а еще ниже – пологий склон долины Лангтанг Хола, сложенный рыхлым обломочным материалом из слившихся конусов выноса. На этом склоне размещены небольшие поселки Сангданса, Лангтранг, Мёндронг, Шингдум, Кянджин Гуанг.

В Восточной Сибири анализируются ледник Азаровой в хр. Кодар, ледник Перетолчина в массиве Мунку-Сардык и ледник № 18 в Восточном Саяне у пика Топографов. Для исследования динамики этих объектов использовались данные каталогов ледников [Каталог, 1972; Каталог, 1973], топографических карт 1950–1960-х гг., имеющаяся аэросъемка, съемка со спутников высокого разрешения, а также собственные экспедиционные и литературные сведения [Коваленко, 2011; Пластинин, 1998; Osipov, Osipova,

2015] (табл. 2). Применялась также авторская информация электронных баз данных (БД) [Kitov, Plyusnin, 2017]. Ледники названных территорий изучаются с середины прошлого столетия. Наибольший период наблюдения (более 100 лет) – у ледника Перетолчина [Перетолчин, 1908].

Таблица 2

Динамика сравниваемых ледников

Ледник, год	Открытая часть		Период, лет	Изменение за период		Скорость изменения в год	
	Площадь, км ²	Длина, км		Площадь, км ²	Длина, км	Площадь, км ²	Длина, км
Ледник Азаровой (№ 20)							
1950, Каталог СССР	1,30	2,10					
1976	0,63	1,71	26	-0,67	-0,39	-0,03	-0,01
1990	0,53	1,64	14	-0,10	-0,07	-0,01	-0,01
2009	0,53	1,56	19	0,00	-0,08	0,00	-0,00
2014	0,55*	1,56	5	0,02	0,00	0,00	0,00
2015	0,48	1,54	1	-0,07	-0,02	-0,07	-0,02
2017	0,46	1,52	2	-0,02	-0,02	-0,01	-0,01
№ 18, Восточный Саян, пик Топографов							
1950, Каталог СССР	1,20	2,50					
1960	1,05	2,35	10	-0,15	-0,15	-0,01	-0,01
1991	1,10	2,32	31	0,05	-0,03	0,00	-0,00
1994	1,08	2,23	3	-0,02	-0,09	-0,01	-0,03
2001	0,94	2,16	7	-0,14	-0,07	-0,02	-0,01
2002	0,90	2,11	1	-0,04	-0,05	-0,04	-0,05
2005	1,03	2,09	3	0,13	-0,02	0,04	-0,01
2008	0,91	2,04	3	-0,12	-0,05	-0,04	-0,02
2010	1,00	2,13	2	0,09	0,09	0,05	0,05
2013	1,00	2,12	3	0,00	-0,01	0,00	-0,00
2014	0,97	2,11	1	-0,03	-0,01	-0,03	-0,01
2015	0,94	2,08	1	-0,03	-0,03	-0,03	-0,03
2016	0,96	2,06	1	0,02	-0,02	0,02	-0,02
Ледник Перетолчина (№ 31)							
1950, Каталог СССР	0,70	1,10					
1960	0,49	1,01	10	-0,21	-0,09	-0,02	-0,01
1994	0,47	1,00	34	-0,02	-0,01	-0,00	-0,00
1998	0,47	1,06	4	0,00	0,06	0,00	0,01
2000	0,40	0,94	2	-0,07	-0,12	-0,03	-0,06
2001	0,41	0,93	1	0,01	-0,01	0,01	-0,01
2002	0,41	0,91	1	0,00	-0,02	0,00	-0,02
2006	0,31	0,90	4	-0,10	-0,01	-0,03	-0,00
2007	0,34	0,86	1	0,03	-0,04	0,03	-0,04
2010	0,33	0,90	3	-0,01	0,04	-0,00	0,01
2015	0,33	0,86	5	0,00	-0,04	0,00	-0,01
2016	0,30	0,81	1	-0,03	-0,05	-0,03	-0,05
2017	0,29	0,81	1	-0,01	0,00	-0,01	0,00
Ледник Кхумбу (№ 133)							
1950, Каталог WGI	13,51	11,88					
1972	10,43	11,09	22	-3,08	-0,79	-0,14	-0,03
1987	4,43	6,33	15	-6,00	-4,76	-0,40	-0,32

Продолжение табл. 2

Ледник, год	Открытая часть		Период, лет	Изменение за период		Скорость изменения в год	
	Площадь, км ²	Длина, км		Площадь, км ²	Длина, км	Площадь, км ²	Длина, км
1989	1,60	3,71	2	-2,83	-2,62	-1,41	-1,31
1992	1,68	3,55	3	0,08	-0,16	0,03	-0,05
1996	1,52	3,54	4	-0,16	-0,01	-0,04	-0,00
2000	1,53	4,02	4	0,01	0,48	0,00	0,12
2002	1,62	4,10	2	0,09	0,08	0,05	0,04
2005	1,40	3,29	3	-0,22	-0,81	-0,07	-0,27
2010	1,49	3,83	5	0,09	0,54	0,02	0,11
2013	1,47	3,39	3	-0,02	-0,44	-0,01	-0,15
2014	3,07	5,69	1	1,60	2,30	1,60	2,30
2015	1,33	3,11	1	-1,74	-2,58	-1,74	-2,58
2017	1,21	2,67	2	-0,12	-0,44	-0,06	-0,22
Ледник Гхонне (№ 6)							
1950 WGI	1,10	2,30					
1972	1,13	2,29	22	0,02	-0,01	0,00	-0,00
1975	1,20	2,48	3	0,07	0,19	0,02	0,06
1976	1,15	2,47	1	-0,05	-0,01	-0,05	-0,01
1977	1,08	2,55	1	-0,07	0,08	-0,07	0,08
1988	0,97	2,26	11	-0,11	-0,29	-0,01	-0,03
2000	0,97	2,23	12	0,00	-0,03	0,00	-0,00
2001	0,95	2,32	1	-0,02	0,09	-0,02	0,09
2006	0,94	2,25	5	-0,01	-0,07	-0,00	-0,01
2009	0,95	2,23	3	0,01	-0,02	0,00	-0,01
2010	0,74	2,19	1	-0,21	-0,04	-0,21	-0,04
2012	0,97	2,20	2	0,23	0,01	0,11	0,01
2013	1,01	2,28	1	0,04	0,08	0,04	0,08
2014	1,08	2,37	1	0,07	0,09	0,07	0,09
2015	0,49	1,48	1	-0,59	-0,89	-0,59	-0,89
2017	0,93	2,34	2	0,44	0,86	0,22	0,43
Ледник Лирунг (№ 7)							
1950 WGI	12,02	7,30					
1972	2,94	4,96	22	-9,08	-2,34	-0,41	-0,11
1992	2,73	6,44	20	-0,21	1,48	-0,01	0,07
2001	1,99	4,50	9	-0,74	-1,94	-0,08	-0,21
2014	1,75	3,70	13	-0,24	-0,80	-0,02	-0,06
2015	1,58	3,53	1	-0,17	-0,17	-0,17	0,17
2017	1,50	3,51	2	-0,08	-0,02	-0,04	0,01
Ледник Юбра (№ 8)							
1950 WGI	6,25	7,00					
1972	4,94	5,63	22	-1,31	-0,37	-0,06	-0,02
1975	6,00	6,13	3	1,06	0,50	0,35	0,17
1976	5,31	5,81	1	-0,69	-0,32	-0,69	-0,32
1977	5,06	5,70	1	-0,25	-0,11	-0,25	-0,11
1988	5,37	5,65	11	0,31	-0,05	0,03	-0,00
1992	4,91	5,64	4	-0,46	-0,01	-0,11	-0,00
2000	4,73	5,48	8	-0,18	-0,16	-0,02	-0,02

Окончание табл. 2

Ледник, год	Открытая часть		Период, лет	Изменение за период		Скорость изменения в год	
	Площадь, км ²	Длина, км		Площадь, км ²	Длина, км	Площадь, км ²	Длина, км
2001	4,74	5,46	1	0,01	-0,02	0,01	-0,02
2006	5,14	5,52	5	0,40	0,06	0,08	0,01
2009	4,87	5,46	3	-0,27	-0,06	-0,09	-0,02
2010	4,50	5,49	1	-0,37	0,03	-0,37	0,03
2012	4,65	5,46	2	0,15	-0,03	0,07	-0,01
2013	4,18	5,43	1	-0,47	-0,03	-0,47	-0,03
2014	4,33	5,48	1	0,15	0,05	0,15	0,05
2015	3,79	5,16	1	-0,54	-0,32	-0,54	-0,32
2017	4,20	5,34	2	0,41	0,18	0,21	0,09

Примечание.* – выделено увеличение площади и длины ледников в определенные годы.

Обсуждение результатов

По данным космической съемки хорошо фиксируются открытые части ледников, оцениваемые нами. Интенсивность бронирования ледников поверхностными моренами в последние годы усиливается [Современные изменения ледников ... , 2015], из-за чего отмечается резкое сокращение открытой части. Общий тренд динамики ледников с середины прошлого века остается прежним – тенденция к сокращению ледников сохраняется. Сибирские ледники за этот период теряли площадь льда в среднем на 0,3 % в год – № 18, на 0,5 – Азаровой и на 0,6 – Перетолчина.

Масштабы изменения зависят от мощности ледника. У значительного по размерам ледника Кхумбу величины изменения больше, чем у малых сибирских ледников, – 1,4 % площади в год. Близок по этому показателю к нему и ледник Лирунг – 1,3 %, а вот ледники Гхонне и Юбра сходны с сибирскими ледниками, их скорости сокращения площади – 0,2 и 0,5 % в год. Ледник Гхонне стоит особняком от других – он является пульсирующим.

В начале 2000-х гг. восточносибирские ледники, Юбра и Лирунг интенсивно деградируют, а вот у ледников Азаровой, Кхумбу, Гхонне темпы деградации замедлились. Затем к 2006 г. идет прирост площади у ледников Юбра, Кхумбу, Гхонне, Азаровой и № 18. К 2010 г. сильно деградируют ледники Юбра и № 18, а Кхумбу и Гхонне даже увеличивают свою площадь. Ледник Лирунг в Гималаях и ледники Азаровой и Перетолчина в Сибири медленно сокращаются. Особенно выделяется 2014 г., когда все ледники, за исключением ледника Перетолчина, имели приращение площади. Затем было резкое сокращение площади в 2015 г. (практически всех анализируемых ледников) и замедление деградации, стабилизация или даже увеличение площади у ледников Юбра, Гхонне и № 18 к 2017 г.

При отступании ледников образуются озера в моренных отложениях [Vajrachaqa, Mool, 2009]. Наблюдается также дробление и увеличение числа ледников при уменьшении площади [Осипов, Осипова, Клевцов, 2017]. С середины прошлого века ледник Перетолчина разделился на северную и юж-

ную части из переметного, а с 2012 г. у северного Перетолчина фактически отделилась западная часть ледника, ставшая самостоятельным ледничком.

В Гималаях с 2010 г. дешифрировалось увеличение накопления снега и ледяных масс. Землетрясение 5 мая 2015 г. спровоцировало сёржи ледников и массовый сход лавин. В национальном парке Лангтанг на пос. Лангтанг сошла нижняя часть языка ледника Гхонне, принеся разрушения и жертвы (250 чел. – местное население и туристы из разных стран). Площадь конуса выноса на террасу составила $0,53 \text{ км}^2$ при толщине льда около 100 м.

Связь динамики ледников с климатическими изменениями просматривается на рис. 5. По данным реанализа ERA-Interim [ERA-Interim, 2015], в местности Лангтанг до 2010 г. наблюдается рост среднегодовой температуры воздуха, а увеличение количества атмосферных осадков с 1998 по 2003 г. привело к замедлению скорости отступления ледников Юбра и Гхонне и даже некоторому увеличению их площади. С 2010 г. температуры воздуха снижаются, а увеличения или уменьшения атмосферных осадков приводят к соответствующим колебаниям площади ледников с запаздыванием в один год.

Для сибирских ледников представлены данные по среднегодовой температуре и осадкам на станции Монды с 2005 по 2018 г. (см. рис. 5, б). Рост температур 2006–2007 гг. усилил деградацию ледников, но значительные по объему осадки и снижение температур в 2008–2010 гг. замедлили скорость деградации, а ледник № 18 с 2008 по 2013 г. даже увеличил площадь. Дальнейшее повышение температур до 2015 г. усилило деградацию. Понижение температуры в 2016 г. вызвало некоторую стабилизацию ледников, а с учетом уменьшения количества атмосферных осадков общий тренд сокращения площади ледников сохраняется.

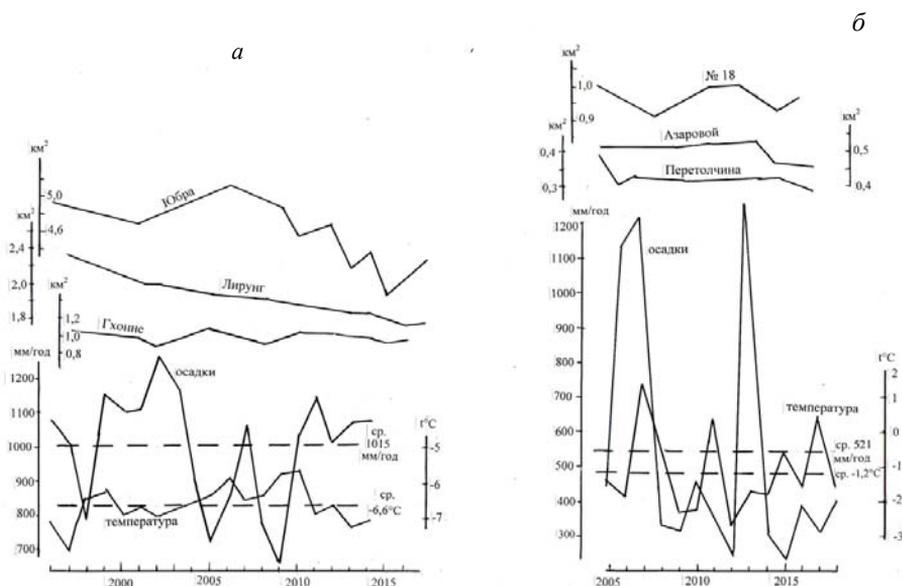


Рис. 5. Изменения площади ледников на фоне климатических изменений в а) Гималаях и в б) горах юга Восточной Сибири

Заключение

Сравнительный анализ динамики некоторых ледников непальских Гималаев и ледников гор юга Восточной Сибири позволил выявить ряд особенностей изменения ледниковых систем в последние десятилетия. Общий для всех тренд – дегляциация, вызванная глобальным потеплением. Особенно существенная убыль размеров ледников наблюдается с конца 1980-х гг., когда ледники потеряли до 20 % своей площади. Главной причиной интенсивного сокращения площади ледников называют повышение летней температуры воздуха за это время на 2,5 °С. С начала 1990-х гг. в Восточной Сибири выделяются годы, когда среднегодовая температура воздуха была выше средней: 1990, 1995, 1997, 2002, 2007, 2011 и 2017 гг.; в непальских Гималаях – 1995, 1998, 1999, 2001, 2004, 2006, 2009, 2010, 2014 и 2017 гг., и холодные годы, когда среднегодовые температуры воздуха были ниже средних: в Сибири – 1996, 2001, 2006, 2010 и 2013 гг., в Гималаях – 1997, 2000, 2002, 2003, 2011, 2012 и 2013 гг. В последнее десятилетие таяние ледников замедлилось, отмечается стабилизация площади.

Список литературы

- Алексеева Н. Н., Тевелев А. В.* Гималаи // Большая рос. энцикл. М., 2007. Т. 7. С. 131–134.
- Каталог ледников СССР.* Л. : Гидрометеиздат, 1972. Т. 17, вып. 2, ч. 1. 44 с.
- Каталог ледников СССР.* Л. : Гидрометеиздат, 1973. Т. 16, вып. 1, ч. 3–5, вып. 2, ч. 1. 64 с.
- Коваленко Н. В.* Режим и эволюция малых форм оледенения. М. : МАКСПресс, 2011. 240 с.
- Коновалова Г. И.* Современное оледенение гор Центральной Азии // Материалы гляциол. исслед. М., 1972. Вып. 19. С. 257–312.
- Современные изменения ледников горных районов России / В. М. Котляков, Т. Е. Хромова, Г. А. Носенко, В. В. Попова, Л. П. Чернова, А. Я. Муравьев, О. В. Ротатова, С. А. Никитин, Н. М. Зверкова. М. : Тов-во науч. изд. КМК, 2015. 288 с.
- Изменение горных ледников в Северном и Южном полушариях за последние 160 лет / В. М. Котляков, Л. П. Чернова, А. Я. Муравьев, Т. Е. Хромова, Н. М. Зверкова // Лёд и Снег. 2017. Т. 57, № 4. С. 453–467. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2017-4-453-467>.
- Осипов Э. Ю., Осипова О. П., Клевцов Е. В.* Инвентаризация ледников Восточного Саяна по материалам космических съёмок // Лёд и Снег. 2017. Т. 57, № 4. С. 483–497. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2017-4-483-497>.
- Перетолчин С. П.* Ледники хребта Мунку-Сардык // Изв. Том. техн. ин-та. Т. 9. Томск : Типолиитография Сиб. т-ва печат. дела, 1908. 60 с.
- 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.
- Плюснин В. М.* Реакция внутриконтинентальных горных геосистем на глобальные изменения климата // География и природ. ресурсы, 2007. № 3. С. 67–74.
- Bajracharya S. R. Mool P.* Glaciers, glacial lakes and glacial lake outburst floods in the Mount Everest region, Nepal // Annals of Glaciology. 2009. Vol. 50, N 53. P. 81–86.
- ERA-Interim*, 2015. URL: <https://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/lev-type=sfc>.
- 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.

IPCC. Climate Change 2013. The Physical Science Basis // Stocker T. F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S. K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P. M., eds. Contribution of Working Group 1 to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York : Cambridge University Press, 2013. 1535 p.

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. Edited by Williams R. S., Ferrigno J. G. U. S. / Keiji Higuchi, Okitsugu Watanabe, Hiroji Fushimi, Shuhei Takenaka, Akio Nagoshi // Geological Survey Professional Paper 1386–F–6, 2015. P. 293–320. URL: <https://pubs.usgs.gov/pp/p1386f/> (датаобращения: 01.08.2018).

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. Vol. 38, N 2. P. 181–187. <https://doi.org/10.1134/S1875372817020093>.

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. Vol. 74, N 3. P. 1969–1984. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4352-4>.

Distinctive Characteristics of formation and dynamics of nival-glacial geosystems in the South of East Siberia and on Mongolian Altai / V. M. Plyusnin, A. D. Kitov, E. N. Ivanov, V. S. Sheinkman // *Geography and Natural Resources*. 2013. Vol. 34, N 1. P. 1–13. <https://doi.org/10.1134/S1875372813010010>

Modelling glacier change in the Everest region, Nepal Himalaya / J. M. Shea, W. W. Immerzeel, P. Wagnon, C. Vincent, S. Bajracharya. *The Cryosphere*. 2015. Vol. 9. P. 1105–1128. <https://doi.org/10.5194/tc-9-1105-2015>.

Investigating Bottom Sediments from Proglacial Lake Ehoy (Eastern Sayan Ridge) by Means of SR-XRF / O.G. Stepanova, V.A. Trunova, A.V. Sidorina, V.V. Zvereva, M.S. Melgunov, S.K. Petrovskii, S.M. Krapivina, A.P. Fedotov, Ya.V. Rakshun // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics*, 2015. Vol. 79, N 1. Allerton Press, Inc., 2015. P. 118–121. <https://doi.org/10.3103/S1062873815010311>.

Suvorov E. G., Kitov A. D. Variability in National Conditions of the Periglacial Zone of the Munku-Sardyk Massif (Eastern Sayan) // *Geography and Natural Resources*, 2017. Vol. 38, N 1. P. 101–110. <https://doi.org/10.1134/S1875372817010139>.

Seasonal and annual mass balances of Mera and Pokalde glaciers (Nepal Himalaya) since 2007 / P. Wagnon, C. Vincent, Y. Arnaud, E. Berthier, E. Vuillermo, S. Gruber, M. Ménégoz, A. Gilbert, M. Dumont, J. M. Shea, D. Stumm, B. K. Pokhrel // *The Cryosphere*. 2007. Vol. 7. P. 1769–1786, <https://doi.org/10.5194/tc-7-1769-2013>.

Comparison of Glacier Dynamics in the Himalayas and Mountains of the Southern Eastern Siberia

A. D. Kitov

V. B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

V. M. Plyusnin

*V. B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Irkutsk, Russian Federation
Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation*

Abstract. The rate of change of several Himalayan glaciers and the glaciers of mountains of the southern Eastern Siberia was studied. A comparative quantitative condition analysis of

existence and morphological parameters of these glaciers was conducted. Global warming has been producing changes in the dynamics of mountain glaciers over the last three decades. The mountain systems under consideration are all experiencing deglaciation caused by global warming having its origins in the 1970s-1980s. The niche glaciers and the flat-summit glaciers undergo the largest reduction in size, whereas the cirque glaciers are reduced the least. There are taking place morphological changes in glacial forms, with cliff glaciers changing to cirque-valley, cirque and niche glaciers. Overall, the process results in formation of a large number of nival-glacial geosystems of transitional forms. Considered were climatic parameters that affect the dynamics of glaciers. Due to an increase in summer air temperature the melting intensity of glaciers also increases, then changes in precipitation amount do not establish any relation. There is not only a reduction, but also a stabilization of the state in some years over the past 50 years. The analysis was performed using GIS, glacier databases and Landsat, Aster, QuickBird and WorldView-1 satellite images.

Keywords: glacier dynamics, mountain glaciers, space images, GIS, Eastern Sayan Mountains, Himalayas.

For citation: Kitov A.D., Pluysnin V.M. Comparison of Glacier Dynamics in the Himalayas and Mountains of the Southern Eastern Siberia. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2019, vol. 29, pp. 68-84. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2019.29.68> (in Russian)

References

- Alexeeva N.N., Tevelev A.V. Gimalai [Himalai]. *Bolshaya rosiiskaya ensiklopediya*. Moscow, 2007, vol. 7, pp. 131-134. (in Russian)
- Katalog lednikov SSSR* [List of glaciers USSR]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1972, vol. 17, is. 2, ch. 1, 44 p. (in Russian)
- Katalog lednikov SSSR* [List of glaciers USSR]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1973, vol. 16, is. 1, ch. 3-5, is. 2, ch. 1, 64 p. (in Russian)
- Kovalenko N.V. *Rezhim i evoluziya malyh form oledeneniya* [Mode and the evolution of small forms of glaciation]. Moscow, Maxpress Publ., 2011, 240 p. (in Russian)
- Konovalova G.I. *Sovremennoe oledenenie gor Zentralnoi Asii* [Contemporary glaciation of the mountains of Central Asia]. *Mat-l y glyaziologich. issled.* Moscow, 1972, is. 19, pp. 257-312. (in Russian)
- Kotlyakov V.M., Hromova T.E., Nosenko G.A., Popova V.V., Chernova L.P., Muraviev A.Ya., Rototaeva O.V., Nikitin S.A., Sverkova N.M. *Sovremennyye ismeneniya lednikov gornyyh raionov Rossii* [Recent changes in the glaciers of mountain regions of Russia]. Moscow, Tovvo nauchnyh isdaniy KMK Publ., 2015, 288 p. (in Russian)
- Kotlyakov V.M., Chernova L.P., Muraviev A.Ya., Hromova T.E., Sverkova N.M. *Ismeneniye gornyyh lednikov v Severnom i Uzhnom polushariyah sa poslednie 160 let* [Changes of mountain glaciers in the Northern and Southern Hemispheres over the past 160 years]. *Led i sneg*, 2017, vol. 57, no. 4, pp. 453-467. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2017-4-453-467>. (in Russian)
- Osipov E.Y., Osipova O.P., Klevzov E.V. *Inventarisaziya lednikov Vostochnogo Sayana po materialam kosmicheskikh semok* [Inventory of glaciers in the Eastern Sayan on the basis of space surveys]. *Led i sneg*, 2017, vol. 57, no. 4, pp. 483-497. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2017-4-483-497>. (in Russian)
- Peretolchin S.P. *Ledniki hrebtu Munku-Sardyk* [Glaciers of the Munku-Sardyk Range. Series *Isv. Tomsk Tehn.Univ.* Vol. 9]. Tomsk, Tipolitografiya Sib. tov-va pechatnogo dela Publ., 1908, 60 p. (in Russian)
- Plastinin L.A. *Distanzionno-kartograficheskoe isuchenie nivalno-glyazialnyh kompleksov gornyyh raionov Sibiri (morfologiya i dinamika lednikov, snezhnikov i nadei hrebtu Kodar v Sabaikalie)* [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, IrGTU Publ., 1998, 142 p. (in Russian)

Plyusnin V.M. Reakziya vnutrikontinentalnyh gornyh geosistem na globalnye ismeneniya klimata [Response of inland mountain geosystems to global climate change]. *Geografiya i prirod. resursy* [Geography and natural resources], 2007, no. 3, pp. 67-74. (in Russian)

Bajracharya S.R. Mool P. Glaciers, glacial lakes and glacial lake outburst floods in the Mount Everest region, Nepal. *Annals of Glaciology*, 2009, vol. 50, no. 53, pp. 81-86.

ERA-Interim, 2015. <https://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc>.

Solomon S., Qin D., Manning M. et al. (eds.). *IPCC. Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, N.Y. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007, 996 p.

Stocker T.F., Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen S.K., Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley P.M. (eds.). *IPCC. Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, Cambridge University Press, 2013, 1535 p.

Keiji Higuchi, Okitsugu Watanabe, Hiroji Fushimi, Shuhei Takenaka, Akio Nagoshi. 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. Edited by Williams R.S., Ferrigno J.G. *U.S. Geological Survey Professional Paper 1386-F-6*, 2015, pp. 293-320. Available at: <https://pubs.usgs.gov/pp/p1386f/> (date of access: 01.08.2018).

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, vol. 38, no. 2, pp. 181-187. <https://doi.org/10.1134/S1875372817020093>.

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, vol. 74, no. 3, pp. 1969-1984. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4352-4>.

Plyusnin V.M., Kitov A.D., Ivanov E.N., Sheinkman V.S. Distinctive Characteristics of formation and dynamics of nival-glacial geosystems in the South of East Siberia and on Mongolian Altai. *Geography and Natural Resources*, 2013, vol. 34, no. 1, pp. 1-13. <https://doi.org/10.1134/S1875372813010010>.

Shea J.M., Immerzeel W.W., Wagnon P., Vincent C., Bajracharya S. Modelling glacier change in the Everest region, Nepal Himalaya. *The Cryosphere*, 2015, vol. 9, pp. 1105-1128, <https://doi.org/10.5194/tc-9-1105-2015>.

Stepanova O.G., Trunova V.A., Sidorina A.V., Zvereva V.V., Melgunov M.S., Petrovskii S.K., Krapivina S.M., Fedotov A.P., RakshunYa.V. Investigating Bottom Sediments from Proglacial Lake Ehoy (Eastern Sayan Ridge) by Means of SR-XRF. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics*, 2015, vol. 79, no. 1, pp. 118-121. <https://doi.org/10.3103/S1062873815010311>.

Suvorov E.G., Kitov A.D. Variability in National Conditions of the Periglacial Zone of the Munku-Sardyk Massif (Eastern Sayan). *Geography and Natural Resources*, 2017, vol. 38, no. 1, pp. 101-110. <https://doi.org/10.1134/S1875372817010139>.

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, vol. 7, pp. 1769-1786, <https://doi.org/10.5194/tc-7-1769-2013>.

Kitov Александр Данилович
кандидат технических наук
старший научный сотрудник
Институт географии им. В. Б. Сочавы
СОРАН

Kitov Aleksandr Danilovich
Candidate of Sciences (Technical)
Senior Research Scientist
V. B. Sochava Institute of Geography SB RAS
1, Ulan-Batorskaya st., Irkutsk, 664033,

*Россия, 664033, Иркутск,
ул. Улан-Баторская, 1
тел.: 8(3952)42-74-72
e-mail: kitov@irigs.irk.ru*

*Russian Federation
tel.: 8(3952)42-74-72
e-mail: kitov@irigs.irk.ru*

*Плюснин Виктор Максимович
доктор географических наук, профессор,
научный руководитель
Институт географии им. В. Б. Сочавы
СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск,
ул. Улан-Баторская, 1
Иркутский государственный университет
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
тел.: 8(3952)52-10-71
e-mail: plyusnin@irigs.irk.ru*

*Plyusnin Victor Maximovich
Doctor of Sciences (Geography),
Professor, Supervisor
V. B. Sochava Institute of Geography
SB RAS
1, Ulan-Batorskaya st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,
Russian Federation
tel.: 8(3952)52-10-71
e-mail: plyusnin@irigs.irk.ru*

Дата поступления: 14.05.2019
Received: May, 14, 2019