

УДК 911.2:528.7:551.32

DOI 10.18413/2712-7443-2020-44-2-198-209

Геоинформационное моделирование основных этапов развития мерзлотных и ледниковых геосистем юга Восточной Сибири

Иванов Е.Н., Силаев А.В.

Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1
E-mail: egoryo@bk.ru

Аннотация. Представлены материалы по картографированию мерзлотных и ледниковых геосистем юга Восточной Сибири. Созданы базы данных, отражающие основные параметры рассматриваемых явлений. Изучены и смоделированы основные этапы развития нивально-гляциальных ландшафтов юга Восточной Сибири. Рассмотрено состояние многолетнемерзлых пород и оледенения за разные временные периоды. Геоинформационный анализ данных разного временного состояния показал развитие мерзлотных и ледниковых геосистем региона с общим направлением уменьшения их площадей. Уточнены географические привязки высотных и геометрических параметров и уровень деградации многолетнемерзлых пород и ледниковых ландшафтов Байкальского региона. Эти результаты являются дополнениями и уточнениями для глобальных моделей и международных баз данных, характеризующих мерзлотные и ледниковые явления на разных уровнях.

Ключевые слова: многолетняя мерзлота, современное оледенение, горные территории, юг Восточной Сибири, Байкальский регион, картографирование.

Для цитирования: Иванов Е.Н., Силаев А.В. 2020. Геоинформационное моделирование основных этапов развития мерзлотных и ледниковых геосистем юга Восточной Сибири. Региональные геосистемы, 44(2): 198–209. DOI 10.18413/2712-7443-2020-44-2-198-209

The GIS modelling of the basic stages of development of the Eastern Siberia's south permafrost and glaciers geosystems

Egor N. Ivanov, Anton V. Silaev

V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS
1 Ulan-Batorskaya St, Irkutsk, 664033, Russia
E-mail: egoryo@bk.ru

Abstract. The main stages of the development of Eastern Siberia's south nival-glacial landscapes in connection with climate change were studied and modeled. Materials are presented on the mapping of permafrost and glacial geosystems in the Eastern Siberia's south and the creation of relevant databases. The state of permafrost and glaciation over different time periods is considered. Analysis of data of different temporal states showed the dynamics of the basic stages of development of permafrost and glacial systems in the region with a general tendency to reduce their area. High-resolution surveys (0.6–2.5 m) of EROS, Quick Bird, and Aster help clarify the boundaries of nival-glacial formations, the degree of reservation by surface moraines, the type of formation, morphological structure, and other object's characteristics. The degree of degradation of nival-glacial formations was determined with the refinement of the coordinates of their centers, area, shape, length, orientation, altitude and other characteristics. These results refine and supplement international databases on permafrost and glacial landscapes of the Baikal region.

Keywords: permafrost, modern glaciations, mountain areas, Eastern Siberia's south, Baikal region, mapping.

For citation: Ivanov E.N., Silaev A.V. 2020. The GIS modelling of the basic stages of development of the Eastern Siberia's south permafrost and glaciers geosystems. *Regional Geosystems*, 44(2): 198–209. (In Russian). DOI 10.18413/2712-7443-2020-44-2-198-209

Введение

В основе современных географических исследований мерзлотных и гляциологических объектов лежит анализ множества данных о физико-географических условиях, структуре почвенно-растительного покрова, данных о геологическом строении и рельефе, пространственном распределении снежно-ледовых форм и т.п. Так как в этом процессе применяются разноформатные данные, важным этапом становится приведение материалов к геометрически сравнимому виду, главным образом в масштабных и проекционных характеристиках. Данный этап в ГИС программах называется взаимным трансформированием и является одним из ключевых элементов геоинформационной обработки данных разного генезиса и содержания.

Геоинформационная модель криогенных и гляциальных геосистем создается в результате совокупного использования разных процессов пространственного и семантического анализа. В атрибутивном наполнении геоинформационной системы с данными о параметрах отдельных компонентов криосферы должны содержаться слои пространственно-координированной информации с временными привязками. В дополнение к такой ГИС необходимо обеспечение возможности аналитического контроля изменчивости моделируемых объектов как посредством наблюдения за изменениями параметров их форм и границ на региональном масштабе, так и сопоставлением отдельных элементов баз данных, имеющих четкие пространственные координаты в разных временных слоях.

Как известно, развитие природных ландшафтов характеризуется необратимыми качественными изменениями определенной направленности в структурах разных иерархических уровней. Выявление структуры в целом осуществляется путем анализа пространственного распределения их границ. Для экстраполяции информации о состоянии рассматриваемых природных объектов использовались методы ландшафтного картографирования.

Формирование атрибутивных таблиц для ГИС проектов по унифицированной методике с применением данных космосъемки и архивных топокарт, дополняемые сведениями из тематических гляцио-мерзлотоведческих карт, делает возможным фиксацию динамических характеристик современного оледенения в течение предшествующих нескольких десятков лет. Открываются возможности оценки и наглядного представления как количественных, так и качественных изменений морфодинамических параметров рассматриваемых объектов. Материалы космической съемки Landsat среднего разрешения (от 15 до 30 м в ед.), находящиеся в общем доступе, позволяют с точностью около пяти процентов определить текущие характеристики и геометрические параметры современного оледенения. Использование материалов космической съемки со спутников EROS, Quick Bird и Aster высокого разрешения (от 0,6 до 2,5 м в ед.) позволяют более точно выделить пограничные параметры нивально-гляциальных объектов, а также уровень их заморенности (покрытия поверхности льда или снега осыпным каменным материалом), типизировать похожие по морфологической структуре или другим характеристикам объекты.

Объекты и методы исследования

Разнообразие геоморфологических и климатических условий Байкальского региона обуславливает распространение криогенно-гляциальных ландшафтов. Большая часть территории характеризуется наличием многолетней мерзлоты, в части высокогорных районов имеется современное оледенение.

Методика картографирования подразделяется на несколько этапов:

– векторизация (трансформация в цифровой вид) данных дистанционного зондирования поверхности Земли и картографических материалов из международных баз данных с

добавлением точных географических координат каждой точке изображения и адаптация к единой проекции;

- формирование объединенной базы данных, содержащей статистические и картографические данные, а также заверочные данные полевых исследований на местности;
- анализ морфометрических характеристик на основе цифровых моделей рельефа с последующим пространственным анализом, основанным на производных картах рельефа;
- составление карты;
- анализ изменения компонентов криосистем с целью выявления структуры мерзлоты (многолетней) на территории путем анализа пространственного и временного распределения;
- выявление динамических аспектов формирования криогенных и гляциальных систем.

При выявлении границ контуров оледенения и типов распространения многолетнемерзлых толщ использовался набор различных картографических материалов, разномасштабные тематические карты, космические снимки регионального охвата и глобальные информационные системы изменений ледового покрова.

Базовыми источниками послужили электронные слои рельефа, гидрографии, почвенно-растительного покрова. Появление в последние годы цифровых моделей рельефа разного пространственного разрешения, сопоставимых по точности с аналогичными данными, взятыми с топографических карт, и усовершенствование технологий сложного пространственного анализа сделали возможным дополнять и расширять методы геоинформационного картографирования и адаптационно применять ее к моделированию крио-гляциальных систем. Для получения изолиний рельефа за основу взята модель SRTM 4-й версии, данные которой можно представить в виде матрицы высот с ячейкой размером в 3 угловые секунды. Эта матрица была преобразована и приведена к масштабу 1:5 000 000, а все цифровые слои интегрированы в единую картографическую проекцию и систему координат (WGS 84). Сопоставление пространственно привязанных слоев рельефа и гидрографической сети в QGIS позволило разграничить и уточнить границы.

Основными источниками данных при анализе многолетней мерзлоты являются тематические карты в различных атласных произведениях. Прежде всего, это карты, составленные в результате комплексных работ ИГ СО РАН им. В.Б. Сочавы по экологическому картографированию бассейна озера Байкал [Сороковой, Жамбалжав, 2015] и мелкомасштабные карты в Национальном атласе России: «Вечная Мерзлота» – масштаб 1:15 000 000, «Сезонное промерзание и протаивание грунтов» – масштаб 1:30 000 000, «Физико-географические зоны в эпоху максимума последнего оледенения (20000–18000 лет назад)» – масштаб 1:40 000 000 [Национальный атлас России, 2020]. В качестве информационной основы применены международные картографические базы данных о ледниках и многолетнемерзлых породах:

- Всемирная служба мониторинга ледников (WGMS), данные представляют собой набор показателей об изменениях ледовых форм [World glaciers ..., 2020].
- Международная ассоциация исследователей вечной мерзлоты (IPA), картографическое отображение фактического изменения состояния вечной мерзлоты в мировом масштабе [International Permafrost Assotiation..., 2020]. Кроме этого, использована статистическая информация о распространении многолетней мерзлоты и материалы общей характеристики состояния и тенденций развития многолетнемерзлых пород Сибири на портале центра данных о снежном покрове и многолетней мерзлоте Всемирного банка данных о климате [Where is Frozen Ground, 2020].

Данные были использованы для сравнительных характеристик при составлении баз данных и аналитической характеристики стадий развития рассматриваемых природных компонентов.

Для отражения уточняющих параметров была применена поканальная компоновка космоснимков Landsat MSS, 5 TM и 7 ETM+, 8. Визуальное дешифрирование выполнялось с различными вариантами комбинаций каналов по прямым и косвенным признакам, таким

как линейные границы, четкие очертания и тому подобные, и уточнялось материалами полевых исследований и принятых классификаций.

В результате проведенного геоинформационного картографирования был создан раздел геопортала Байкальского региона «Мерзлота и оледенение» [Плюснин и др., 2017б].

Результаты и обсуждения

Территориальное распределение многолетнемерзлых пород отражает этапы их развития в разные временные периоды (рис. 1) [Плюснин и др., 2017б].

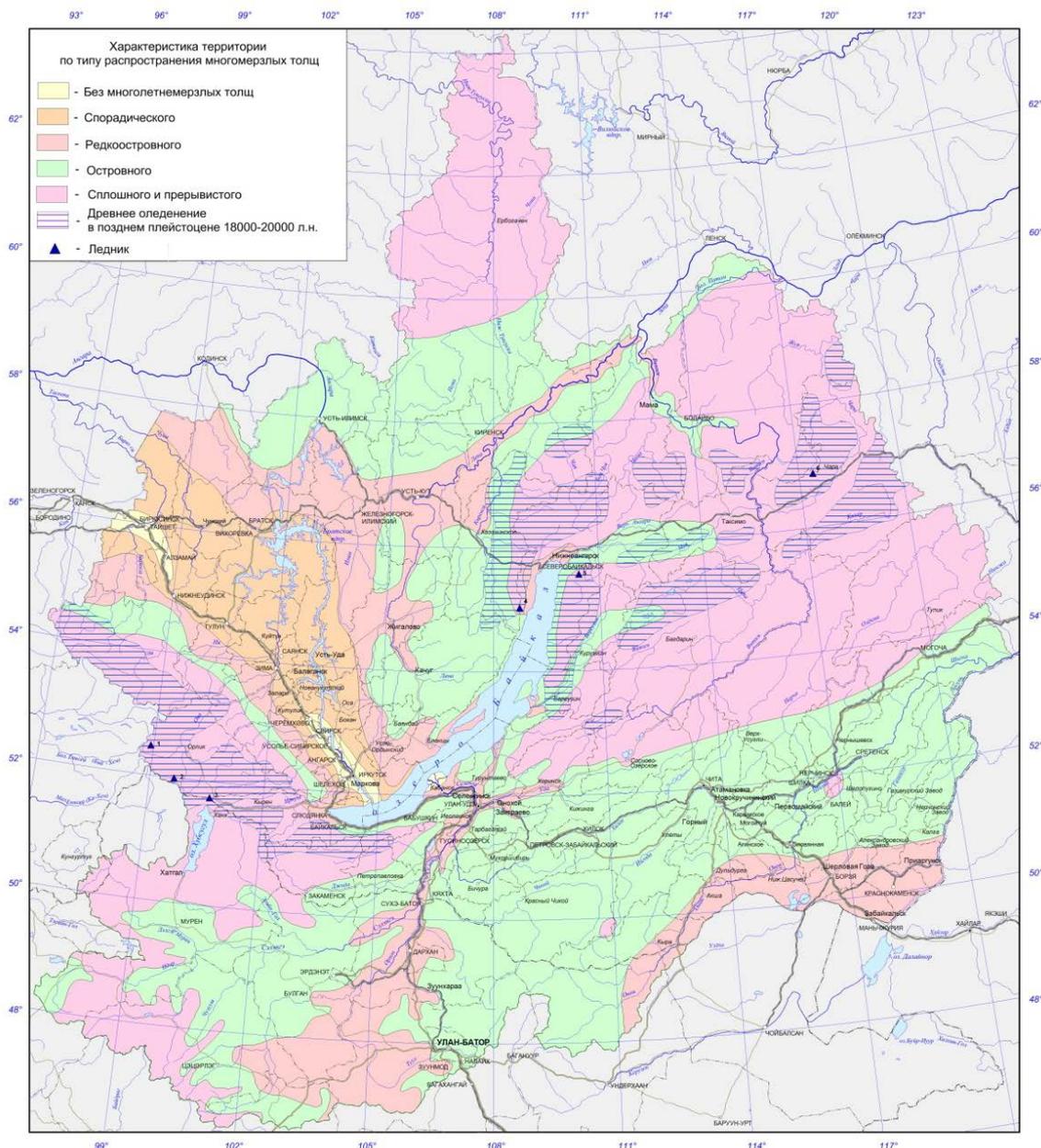


Рис. 1. Распространение криогенно-гляциальных ландшафтов в Байкальском регионе
Fig. 1. The cryogenic-glacial landscapes distribution to Baikal region

Данная карта, составленная авторами, коррелирует со среднemasштабной картой мерзлоты Северного полушария километрового разрешения, составленной коллективом авторов на основе глобальной модели ТТОР [Obu et al., 2019].

Многолетнемерзлые породы по степени распространения, мощности толщи и ее температуре делятся на пять видов территорий распространения многолетнемерзлых толщ:

спорадического, редкоостровного, островного, прерывистого и сплошного [Сороковой, Жамбалжав, 2015].

Территория, на которой грунты промерзают только в отдельные сезоны, распространяется на долину истока Ангары, дельту Селенги и в западной части, примыкающей к Восточному Саяну в пределах восточной окраины Канско-Рыбинской равнины. Общая площадь около 13 тыс. км². На участках, сложенных преимущественно глинистыми породами, периодически могут возникать мерзлые перелетки и новые мерзлые толщи. Толщина слоя, на который породы промерзают зимой, варьирует от двух метров в суглинках до двух с половиной метров в песках. Преобладающими процессами и явлениями мерзлотного генезиса являются пучение и морозное растрескивание грунта, а также реликтовые проявления термокарста.

Спорадическое размещение многолетнемерзлых толщ целиком сосредоточено на иркутско-черемховской равнине и в верхней части долины реки Ангары. Обособленные участки в виде островков и линз мерзлых пород приурочены только к сырým низинам, сложенным суглинками и супесями, подвергавшимся заторфовыванию с поверхности. Площадь этого типа многолетней мерзлоты чуть менее 120 тыс. км². Толщина многолетнемерзлого слоя толщи может достигать 10–15 м. Величина среднегодовой температуры мерзлой толщи варьирует от 0 °С до –0,2 °С. К преобладающим мерзлотным процессам и явлениям здесь относятся сезонные бугры пучения, реликтовые участки термокарста и морозное растрескивание грунта.

Многолетнемерзлые толщи, характеризующиеся распространением в виде редких островков, так и называемые – редкоостровные, приурочены к заболоченным участкам в днищах долин, в нижней части северных склонов возвышенностей, сложенных глинистыми породами, заторфованными с поверхности. Это центральная часть Иркутской области с долиной реки Лена, почти весь бассейн реки Селенга и юго-восточная часть региона по долине реки Онон и восточнее, общей площадью 285 тыс. км². Толщина слоя промороженных пород составляет 20–30 метров. Величина среднегодовой температуры этого промороженного слоя варьирует от –0,1 °С до –0,5 °С.

Островные многолетнемерзлые толщи распространены по территории почти в 3 раза большей, чем редкоостровные. Они занимают более 710 тыс. км². Толщина слоя промороженных пород – 50–80 метров. Отдельные участки в виде островов мерзлых пород можно встретить в любых элементах рельефа, однако типичной особенностью они являются для увлажненных, заболоченных участков в местах, скрытых от прямого солнечного воздействия большую часть суток, либо для высотного пояса выше тысячи метров над уровнем моря. Тальмы обычно бывают закарстованные породы либо массивы песчаных пород. Величина среднегодовой температуры этого промороженного слоя варьирует от –0,2 °С до –1 °С. Преобладающими мерзлотными процессами здесь являются наледообразование, термокарст, морозное растрескивание грунта, солифлюкция на склонах и бугры пучения.

Максимально близкая концентрация по степени распространения к сплошному типу, но с отдельными островками непромороженных пород, носит название прерывистого распространения мерзлоты. Такой тип пространственного распределения многолетнемерзлых толщ развит на всех элементах рельефа в пределах следующих высотных зон: среднегорная, высокогорная и гольцовая. Эти отдельные участки талых пород приурочены только к донным частям крупных рек и озер, а также к зонам тектонических разломов в местах выхода подземных водных источников на поверхность. Кроме того, они могут встречаться в трещинах экзогенного выветривания и местами, как и у предыдущих типов распространения, на галечниках, песках и породах, подвергшихся термокарсту.

Четкое разграничение областей сплошного и прерывистого залегания многолетнемерзлых пород затруднено, так как в основном приурочено к высотным уровням территории. Общая площадь сплошного и прерывистого распространения многолетнемерзлых толщ 730 тыс. км².

Сплошное распространение мерзлотных толщ характеризует высокогорья и большую часть гольцовой зоны. Здесь многолетнемерзлые толщи достигают мощности от 100 до 300 м и до 500–600 м на водораздельных участках. Величина среднегодовой температуры этого промороженного слоя варьирует от $-0,5$ °С до -3 °С. В самой суровой зоне складывается весь ряд преобладающих мерзлотных процессов и явлений криогенного плана: от морозного выветривания, бугров пучения, курумообразования и термокарста до солифлюкции и наледообразования [Шейнкман, 2015].

Сведения о степени деградации многолетнемерзлых пород важны для прогнозирования природных условий [Masyagina, Menyailo, 2020]. Криогенно-гляциальные явления разного генезиса имеют функциональные взаимосвязи в Байкальском регионе, в котором ярко выражены резкоконтинентальность климатических условий и особенности рельефа территории. Наличие современного оледенения в условиях малой обеспеченности твердыми осадками и значительной амплитудой годовых колебаний температурного режима частично обуславливается сильным промораживанием в зимний период.

Следует отметить огромный размер ареала повторно-жильных льдов, которые для своего формирования требуют глубокого охлаждения горных пород. Обычно граница повторно-жильных льдов проводится, огибая с севера Ангару, Байкал и Амур, берега которых, а также оз. Хубсугул отеплены. Однако после находок повторно-жильных льдов в предгорьях Хингана и Восточного Саяна граница повторно-жильных льдов проведена, огибая Ангару, Байкал и Амур с юга. Самые южные повторно-жильные льды обнаружены в Прихубсугулье и на севере Хингана. Больше промерзание, будучи отражено в появлении собственно ПЖЛ, фиксируется на востоке Алтае-Саянской горной страны, и уже в Забайкалье эти льды показывают превалирование сплошных низкотемпературных многолетнемерзлых пород не только в высокогорье, но и в низко- и среднегорье [Плюснин и др., 2017б].

Древнее и современное оледенение приурочено к горным системам региона. Под древним оледенением подразумевается ледниковый максимум позднего плейстоцена, 18–20 тысяч лет назад зафиксированный в формах рельефа. После этого оледенения более широкого распространения ледников не происходило, что и позволило сохраниться следам оледенения данного периода. Древнее оледенение, по разным оценкам, полностью покрывало горные сооружения Восточного Саяна, Хамар-Дабана, хребтов Байкальский, Баргузинский, Кодар, Хинган, Хангай, Каларский, Янкан и Удокан, Лонгдорский массив и Чаро-Токкинский узел, а также Хэнтей-Даурское нагорье. Всего под древними ледниками находилось около 190 тыс. км² поверхности [Sheinkman, 2015].

Современное оледенение региона сохранилось в самых высокогорных областях современных горных хребтов: Кодар, Восточный Саян, Байкальский, Баргузинский, Хангай (см. рис. 1). Все современные ледники региона представлены малыми формами, площадь самого большого около 2 км². Изучение современного оледенения происходит в контексте широкого меридионального трансекта горных хребтов с современным оледенением от хр. Кодар на севере до Хангая и Монгольского Алтая на юге [Иванов, 2015].

Ключевые участки обозначенного выше трансекта характеризуется высокогорными климатическими условиями. Они обусловлены своим центрально-азиатским положением на границе таежной увлажненной и степной засушливой зон и морфологией каждого горного массива. Также играет роль неравномерность распределения осадков, приводящая к уменьшению степени континентальности к северу. Однако на локальном уровне возрастание абсолютной высоты коррелирует с увеличением количества осадков [Osipova, Osipov, 2019].

Сравнительная характеристика гляциально-климатических характеристик горных районов с наличием современных ледников малого типа представлена в табл. 1.

Таблица 1
Table 1

Гляциологические и климатические параметры некоторых горных районов с малыми ледниками
Glacial and climate parameters of some mountain areas with little glaciers

Ледниковый район	Площадь оледенения, км ²	Количество ледников	Осадки, мм в год	Среднегодовая температура, °С	Средняя температура зима/лето, °С
Большой Кавказ	1011	1800	2000*	3*	-6 / +14*
Полярный Урал	15	76	740	-5	-13 / +9
Алтай	628	1100	1500*	-3*	-19 / +15*
Горы юга Восточной Сибири	30,7	68	400–550	от -2 до -7	-30 / +12
Байкальский хребет	0,41	1	550	-3	-25 / +15
Кодар	18,8	39	500	-7	-30 / +5
Восточный Саян, Мунку-Сардык	1,5	5	450	-2	-25 / +12
Восточный Саян, пик Топографов	10	23	400	-5	-27 / + 8

Примечание: * Локальные данные по массивам Псеашхо (Кавказ), Биш-Иирду (Алтай).

В рамках трансекта выделено 5 ключевых участков и выбраны репрезентативные ледники на каждом из них. Общими для них являются наличие рядом наивысшей вершины хребта и действующие ледники, а также повсеместно рекогносцируемые признаки древних форм оледенения и слабая степень антропогенной нарушенности [Vladimirov et al., 2020].

Основные показатели ледников ключевых участков представлены в табл. 2.

Таблица 2
Table 2

Основные показатели ледников ключевых участков
The glaciers main indicators of key areas

Ледник	Длина, км	Площадь, км ²	Верх. точка, м над ур. моря	Конец языка, м над ур. моря
№ 18 пика Топографов	1,30	1,12	2650	2380
Миддендорфа	0,30	0,20	2900	2460
Северный Перетолчина	0,50	0,30	3460	2947
г. Черского	0,70	0,35	2000	1910
Урёл-Амутис	0,40	0,14	2205	2010
№ 20 Азаровой	1,45	0,45	2475	2050

Первый участок – нивально-гляциальные геосистемы хр. Кодар. По данным аэрофотосъемки 1963 и 1968 гг. 30 ледников хребта занесены в соответствующий том Каталога ледников СССР [Каталог ледников СССР, 1972]. Далее эти показатели неоднократно уточнялись в большую сторону. В настоящее время современные ледники здесь рекогносцированы в пределах высот 1900–2400 м над ур. моря в 39 карах альпинотипного высокогорья, их общая площадь оледенения более 15 км² [Kitov, Plyusnin, 2017].

Интенсивное расчленение рельефа в хребте Кодар обусловило то обстоятельство, что все ледники здесь расположены в карах и глубоких верховьях троговых долин. Узкие водораздельные гребни Кодара не оставляют достаточное количество места для формирования фирновых полей значительных размеров. Из-за этого фирновые бассейны ледников хребта характеризуются относительно небольшими размерами.

Общим свойством всех ледников и снежников хребта Кодар является то, что все они лежат ниже на 800–1000 м, чем рассчитанная для них климатическая снеговая граница. Высокая степень расчленения высокогорья делает это возможным. Общая протяженность открытой части ледников в 1979 г. была определена цифрой 33,8 км, а к 2009 г. она сократилась на 8,4 км – до 25,4 км. То есть в среднем сокращение составило 7 м/год для одного ледника. В свою очередь, уровень средней высоты концов ледников поднялся на 25 м, а площадь открытой части ледников сократилась на 15 %: с 11,25 до 9,6 км². Наименьшим изменениям подверглись каровые ледники северной экспозиции, наибольшим – присклоновые ледники, ориентированные в южном направлении [Naprasnikov, Plyusnin, 2015].

Репрезентативным ледником выбран ледник Азаровой (№ 20 по Каталогу ледников СССР). Площадь ледника Азаровой в 2009 г. составляла 0,60 км², а длина – 1,4 км, он ориентирован на север. В настоящее время основной тип его питания – лавинный, так было установлено и в 1979 г. Он продолжает формировать асимметричный поперечный профиль ледника: пологий наклон поверхности с запада на восток и вниз по долине. Его зона аккумуляции концентрируется вдоль западного края от 2 250 до 2 480 м. Можно вычислить среднюю высоту ледника Азаровой, величина составит 2 300 м. Отступление от проксимальной морены составляет около 400 м [Kitov, Plyusnin 2017].

Второй ключевой участок находится в центральной части Байкальского хребта, на нем располагается 3 ледниковых формы и репрезентативный ледник у высочайшей вершины хребта – горы Черского (2 588 м), в 20 км от побережья оз. Байкал. Ледник имеет следующие размеры: длина 930 м, площадь 410 м². Он имеет юго-восточную экспозицию, как и занимаемый им кар. Около 20 % длины всего ледника занимает язык, он под высоким углом спускается с ригеля, образуя срединную морену и поперечные трещины. В целом ледник характеризуется ровной поверхностью, залегает в среднем на высоте 2100 м. Его край отстоит от проксимальной морены на 200 м. Степень сокращения ледника у горы Черского по сравнению с ледниками других ключевых участков является наименьшей. Сравнение космоснимка Landsat-7 2002 г. и топокарты масштаба 1:25 000 1965 г. этой территории показало, что сокращение длины составило около 150 м, с 1,09 до 0,93 км, а площади около 0,04 км², с 0,45 до 0,41 км². Нижний уровень ледника поднялся с 1745 до 1790 м над ур. моря.

Третий участок – северная часть Баргузинского хребта. Здесь расположены два небольших ледника общей площадью 0,2 км². Для изучения взят ледник, получивший название Урёл-Амутис в 2013 г. в результате экспедиции авторов в верховья р. Светлой в 30 км от оз. Байкал, площадью 0,14 км². Он имеет северную экспозицию и начинается практически с ближайшей вершины 2 377 м, расстояние его края от проксимальной морены составляет около 200 м, а средняя высота – 2100 м [Ivanov et al., 2015]. Устойчивость ледников северобайкальских горных хребтов вызвана, по-видимому, стабилизирующим воздействием акватории озера Байкал.

В пределах Восточного Саяна выбрано 2 ключевых участка.

Первый из них – это северная часть ледникового массива горы Мунку-Сардык (3491 м). Центральная часть массива характеризуется распространением альпинотипных форм рельефа, то есть острыми пиками высотой 2500–3400 м над ур. моря, соединенными водораздельными гребнями. Здесь много каров, днища которых чаще всего являются горными озерами. Об оледенении прежних эпох здесь наглядно свидетельствуют моренные комплексы и окатанные скалы, «бараньи лбы», а также троговая форма долин всех современных рек района. Всего пять современных ледников общей площадью 0,82 км² в настоящее время рекогносцировано в пределах данного горного массива. По состоянию 1902–

1906 гг. исследователи оценивали площадь в два раза большей величиной – 1,68 км². Ледники массива относятся к 2 бассейнам: река Иркут (Россия) и озеро Хубсугул (Монголия) [Kitov et al., 2019].

Второй участок в Восточном Саяне – ледниковый массив у пика Топографов (3089 м), на котором расположены восемь ледников, центрированных на пик. Базовым объектом в этом массиве выбран ледник № 18 северо-восточной экспозиции и площадью 820 м². Он является самым длинным в массиве (1,7 км), лежит на средней высоте 2600 м, нижняя точка его открытой части отстоит от фронтальной морены на 800 м. Остальные ледники массива сократились в длине в среднем на 300 м. Один из ледников, в каталоге обозначенный под № 15, прекратил свое существование к настоящему времени. Общая площадь современного оледенения массива стала меньше на 27 % – с 5,3 до 3,85 км². Учитывая, что аэрофотосъемка для Каталога ледников [Каталог ледников СССР, 1973] осуществлялась в 1953–1956 гг., можно определить среднее сокращение длины за более чем полвека на 6,5 м/год. Геоморфологический анализ показал, что ледники массива № 16 и 17 являются едиными нивально-гляциальным образованием, разделенным на поверхности моренным материалом. Целесообразно обозначить на картографических материалах его в качестве одного ледника площадью 500 м² и длиной 1,6 км.

Нижняя граница хионосферы, является важным параметром, выше которого снежно-ледовые образования сохраняются круглый год. Измерения на ключевых участках нижней границы ледников и снежников (которые в рассматриваемых горных территориях чаще всего соответствуют нижним краям ледников) можно сравнить с теоретически высчитанными границами для каждого высотного пояса. Результаты сравнения удобно представить в виде таблицы (табл. 3).

Таблица 3
Table 3

Снеговая линия (нижний уровень хионосферы) ключевых участков
The key areas' snowline (chionosphere low level)

Территория	Ледник	Широта	У-1963, м	У-1981, м	Сн. л., м
Кодар	Азаровой	56,9° с.ш.	3300	3100	1900
Байкальский хребет	Черского	55° с.ш.	3400	3200	1750
Восточный Саян	№ 18	52,5° с.ш.	3100	3000	2600
Восточный Саян	Перетолчина	51,43° с.ш.	3600	3500	2950

Примечание: У-1963 – теоретическая нижняя граница хионосферы по Г.К. Тушинскому и Н.М. Малиновской; У-1981 – теоретическая нижняя граница хионосферы по В.Б. Выркину и В.М. Плюснину; Сн. л. – снеговая линия, измеренная в ходе полевых исследований автора в 2013–2016 гг.

Анализ динамического состояния нивально-гляциальных объектов юга Восточной Сибири показал, что во всех рассматриваемых горных территориях происходит дегляциация, соответствующая глобальным трендам климатических изменений, заметным с 1970-х годов. Показатель повышения средней температуры за этот период для Прибайкалья составил 0,2–0,5 °С/10 лет [Плюснин и др., 2017а].

Высокая степень регрессии наблюдается у присклоновых ледников и ледников плоских вершин, невысокая – у каровых. Все полностью стаявшие ледники являются ориентированными на юг. Лавинное питание как основной фактор питания ледников увеличивается с юга на север.

У каровых ледников существенная убыль объема осуществляется за счет утоньшения, по площади они сокращаются не так значительно. Эта особенность в основном и отличает

внутриконтинентальные ледники от тех, что залегают в горных хребтах близко к океанам и другим крупным акваториям. У «приокеанических» основное сокращение происходит именно по длинам и площадям. Для сибирских ледников важен запас холода, который накапливается в холодный период года и препятствует затем интенсивному таянию, а также намо-раживает часть жидкого стока, делая его вновь частью нивально-гляциальной системы. Чем больше каровый ледник бронируется обломочно-осыпным материалом, тем меньше он подвержен отепляющему воздействию окружающей среды, но вместе с тем его движение тоже постепенно затухает, что переводит его из формы ледника в форму карового глетчера.

Заключение

Геоинформационное моделирование позволило проследить основные этапы развития мерзлотных и нивально-гляциальных геосистем региона.

Так как для районов распространения многолетней мерзлоты необходимыми условиями являются отрицательная среднегодовая температура воздуха, сухие и холодные зимние периоды, непродолжительное лето, малоинтенсивные осадки, можно провести корреляционное сравнение распространения таких условий в настоящее время и климатическими этапами прошлого. Контурсы границы залегания многолетнемерзлых пород находятся в постоянном изменении. В последние десятилетия скорость их деградации увеличивается вслед за перемещением климатически их обуславливающих факторов. Формирование основного массива многолетнемерзлых пород региона привязано к концу последнего ледникового периода в конце плейстоцена – начале голоцена. Позже происходила постепенная деградация и смещение границ к северу.

Этапы развития оледенения также отражают основные климатические циклы. Общим для всех изучаемых ледников в настоящее время является уменьшение их размеров – длин, площадей, объемов, вызванное глобальными изменениями климата, начавшимися с середины 70-х годов прошлого столетия. Пики повышения средней температуры в общем для Прибайкалья фиксировались в 2002, 2003, 2007, 2011 гг. В промежутках между пиками в 2009, 2010, 2012 и 2013 гг. отражаются более медленные темпы абляции исследуемых ледников.

Анализ базы данных показал уменьшение в среднем ледниковых параметров практически вдвое как по площадям, так и по длинам. Также четко видно понижение верхних и снижение нижних границ ледников каров. Отмечается заморенивание склоново-осыпным материалом выположенных ледниковых языков и трансформация ледников в каменные глетчеры и многолетние снежники, преимущественно в карах, ориентированных на южную сторону. Под воздействием текущих климатических изменений ледники меняются в морфологическом плане:

- ледники, ранее рекогносцированные как переметные, делятся на независимые части и становятся каровыми и долинными;
- ледники, считавшиеся каровыми, сокращаются и прижимаются к одному склону, становясь присклоновыми.

Динамическая устойчивость ледников зависит от степени наличия и устойчивости многолетнемерзлых пород, перераспределения снежных масс ветровым переносом, наличия поблизости больших акваторий, таких как Байкал или Хубсугул. Кроме того, смоделированные данные по нивально-гляциальным и мерзлотным объектам дают основу для следующей стадии научных исследований, таких как эволюция экзогенных процессов горных территорий и прогнозирование изменений нивально-гляциальных ландшафтов юга Восточной Сибири в связи с климатическими изменениями.

Список источников

1. Национальный атлас России. Электронный ресурс. URL: <https://национальныйатлас.рф> (дата обращения: 15 марта 2020).
2. International Permafrost Assotiations. Electronic resource. Available at: <https://ipa.arcticportal.org> (accessed: 15 March 2020)

3. Where is Frozen Ground? National Snow&Ice Data Center, World Data System. Electronic resource. Available at: https://nsidc.org/cryosphere/frozenground/whereis_fg.html (accessed: 15 March 2020)

4. World glaciers monitoring service. Electronic resource. Available at: <https://wgms.ch/> (accessed: 15 March 2020)

Список литературы

1. Иванов Е.Н. 2015. Динамика снежно-ледовых геосистем гор юга Восточной Сибири: монография. Иркутск, Изд-во ИГ СО РАН, 145 с.

2. Каталог ледников СССР. Забайкалье. Хребет Кодар. 1972. Т. 17. Вып. 2. Ленинград, Гидрометеиздат, 120 с.

3. Каталог ледников СССР. Ангаро-Енисейский район. 1973. Т. 16. Вып. 1, 2. Ленинград, Гидрометеиздат, 130 с.

4. Плюснин В.М., Иванов Е.Н., Китов А.Д., Шейнкман В.С. 2017а. Динамика современных ледников в горах юга Восточной Сибири. География и природные ресурсы, 3: 107–117.

5. Плюснин В.М., Иванов Е.Н., Китов А.Д., Силаев А.В. 2017б. Мерзлота и оледенение. В кн.: Экологический атлас Байкальского региона. Иркутск, ИГ СО РАН.

6. Сороковой А.А., Жамбалжав Я. 2015. Мерзлотное районирование. Экологический атлас бассейна озера Байкал. Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 33 с.

7. Шейнкман В.С. 2015. Криолитозона. В кн.: География Сибири в начале XXI века. Природа. Новосибирск, академическое изд-во "Гео": 173–194.

8. Ivanov E.N., Plyusnin V.M., Kitov A.D., Kovalenko S.N., Balyazin I.V., Sofronov A.P. 2015. Inventory of nival-glacial geosystems in Lake Baikal area (East Siberia, Russia). *Environmental Earth Sciences*, 74 (3): 1957–1968.

9. Kitov A.D., Plyusnin V.M. 2017. The Database and Gis Analysis of The Status of Glaciation of the Kodar Mountains (Northern Transbaikalia). *Geography and Natural Resources*, 38 (2): 181–187.

10. Kitov A.D., Plyusnin V.M., Bilichenko I.N. 2019. Change of glaciers in the Himalayas and Southern Siberia according to Landsat Proceedings of the International conference "InterCarto. InterGIS", 25 (2): 146–160 <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2019-2-25-146-160>

11. Masyagina O.V., Menyailo O.V. 2020. The impact of permafrost on carbon dioxide and methane fluxes in Siberia: A meta-analysis. *Environmental Research*, 182: 109096. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.109096>.

12. Naprasnikov A.T., Plyusnin V.M. 2015. The Snow Cover Distribution Behavior in the Baikal-Mongolian Region. *Geography and Natural Resources*, 36 (2): 193–197.

13. Obu J., Westermann S., Bartsch A., Berdnikov N., Christiansen H., Dashtseren A., Delaloye R., Bo E., Eitzelmueller B., Kholodov A., Khomutov A., Kääh A., Leibman M., Lewkowicz A., Panda S., Romanovsky V., Way R., Westergaard-Nielsen A., Wu T., Yamkhin J., Zou D. 2019. Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1km² scale. *Earth-Science Reviews*, 193: 299–316.

14. Osipova O.P., Osipov E.Y. 2019. Atmospheric Circulation Processes and Precipitation Regime in the Northern Part of the Baikal Mountain Region. *Russ. Meteorol. Hydrol*, 44: 695–703.

15. Sheinkman V. 2015. Quaternary glaciation in North-Western Siberia – new evidence and interpretation. *Quaternary International*, 420: 15–23.

16. Vladimirov I.N., Plyusnin V.M., Sorokovoi A.A. 2020. Geographical and Environmental Research of Transboundary Territories: Results and Prospects. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. First International Geographical Conference of North Asian Countries "China-Mongolia-Russia Economic Corridor: Geographical and Environmental Factors and Territorial Development Opportunities": 12–18.

References

1. Ivanov E.N. 2015. Dynamics of snow-ice geosystems of mountains in the south of Eastern Siberia: monograph. Irkutsk, Izd-vo IG SO RAN, 145 p. (in Russian)

2. Katalog lednikov SSSR. Zabajkal'e. Hrebet Kodar [Catalog of glaciers of the USSR. Transbaikalia. Kodar Range]. Vol. 17. Is. 2. Leningrad, Gidrometeoizdat, 120 p.

3. Katalog lednikov SSSR. Angaro-Eniseiskii rajon [Catalog of glaciers of the USSR. Angara-Yenisei region]. 1973. Vol. 16. Is. 1, 2. Leningrad, Gidrometeoizdat, 130 p.

4. Pljusnin V.M., Ivanov E.N., Kitov A.D., Shejnkman V.S. 2017a. The dynamics of modern glaciers in the mountains of the south of Eastern Siberia. *Geography and Natural Resources*, 3: 107–117. (in Russian)
5. Pljusnin V.M., Ivanov E.N., Kitov A.D., Silaev A.V. 2017b. Permafrost and glaciation. In: *Ecological atlas of the Baikal region*. Irkutsk, IG SO RAN. (in Russian)
6. Sorokovoi A.A., Zhambalzhav Ja. 2015. Permafrost zoning. *Ecological atlas of the Baikal basin*. Irkutsk, Izd-vo Instituta geografii im. V.B. Sochavy SO RAN, 33 p. (in Russian)
7. Shejnkman V.S. 2015. Cryolithozone. In: *Geography of Siberia at the beginning of the XXI century*. Nature. Novosibirsk, akademicheskoe izd-vo "Geo": 173–194. (in Russian)
8. Ivanov E.N., Plyusnin V.M., Kitov A.D., Kovalenko S.N., Balyazin I.V., Sofronov A.P. 2015. Inventory of nival-glacial geosystems in Lake Baikal area (East Siberia, Russia). *Environmental Earth Sciences*, 74 (3): 1957–1968.
9. Kitov A.D., Plyusnin V.M. 2017. The Database and Gis Analysis of The Status of Glaciation of the Kodar Mountains (Northern Transbaikalia). *Geography and Natural Resources*, 38 (2): 181–187.
10. Kitov A.D., Plyusnin V.M., Bilichenko I.N. 2019. Change of glaciers in the Himalayas and Southern Siberia according to Landsat Proceedings of the International conference "InterCarto. InterGIS", 25 (2): 146–160 <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2019-2-25-146-160>
11. Masyagina O.V., Menyailo O.V. 2020. The impact of permafrost on carbon dioxide and methane fluxes in Siberia: A meta-analysis. *Environmental Research*, 182: 109096. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.109096>.
12. Naprasnikov A.T., Plyusnin V.M. 2015. The Snow Cover Distribution Behavior in the Baikal-Mongolian Region. *Geography and Natural Resources*, 36 (2): 193–197.
13. Obu J., Westermann S., Bartsch A., Berdnikov N., Christiansen H., Dashtseren A., Delaloye R., Bo E., Eitzelmueller B., Kholodov A., Khomutov A., Kääh A., Leibman M., Lewkowicz A., Panda S., Romanovsky V., Way R., Westergaard-Nielsen A., Wu T., Yamkhin J., Zou D. 2019. Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1km² scale. *Earth-Science Reviews*, 193: 299–316.
14. Osipova O.P., Osipov E.Y. 2019. Atmospheric Circulation Processes and Precipitation Regime in the Northern Part of the Baikal Mountain Region. *Russ. Meteorol. Hydrol*, 44: 695–703.
15. Shejnkman V. 2015. Quaternary glaciation in North-Western Siberia – new evidence and interpretation. *Quaternary International*, 420: 15–23.
16. Vladimirov I.N., Plyusnin V.M., Sorokovoi A.A. 2020. Geographical and Environmental Research of Transboundary Territories: Results and Prospects. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. First International Geographical Conference of North Asian Countries "China-Mongolia-Russia Economic Corridor: Geographical and Environmental Factors and Territorial Development Opportunities": 12–18.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Иванов Егор Николаевич, кандидат географических наук, научный сотрудник лаборатории геоморфологии Института Географии им. В.Б. Сочавы СО ОРАН, г. Иркутск, Россия

Силаев Антон Владимирович, кандидат географических наук, научный сотрудник лаборатории физической географии и биогеографии Института Географии им. В.Б. Сочавы СО ОРАН, г. Иркутск, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Egor N. Ivanov, candidate of geographical Sciences, researcher of the Laboratory of Geomorphology of the V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Irkutsk, Russia

Anton V. Silaev, candidate of geographical Sciences, researcher of the Laboratory of Physical Geography and Biogeography of the V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Irkutsk, Russia