

На правах рукописи

Дьякова Галина Сергеевна

КАМЕННЫЕ ГЛЕТЧЕРЫ ЦЕНТРАЛЬНОГО АЛТАЯ

Специальность – 1.6.14 – Геоморфология и палеогеография

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата географических наук

Барнаул – 2026

Работа выполнена на кафедре физической географии и геоинформационных систем института географии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный университет» (г. Барнаул)

Научный руководитель:

Останин Олег Васильевич,

кандидат географических наук, доцент, доцент кафедры физической географии и геоинформационных систем института географии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный университет», г. Барнаул

Официальные оппоненты:

Плюснин Виктор Максимович,

доктор географических наук, профессор, научный руководитель Института географии имени В.Б. Сочавы Сибирского отделения Российской академии наук, г. Иркутск

Глазовский Андрей Федорович,

кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник отдела гляциологии Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт географии Российской академии наук», г. Москва

Ведущая организация:

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск

Защита диссертации состоится 18 сентября 2026 г., в 14:00 часов, на заседании диссертационного совета 24.1.049.04 на базе ФГБУН «Институт географии Российской академии наук» по адресу: 119017, г. Москва, Старомонетный переулок, д. 29, стр. 4. Факс: (495) 959-00-16, e-mail: d00204603@igras.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института географии РАН и на интернет-сайте: <http://igras.ru/>. Отзывы на автореферат в одном экземпляре, заверенные печатью организации, просим направлять на указанный выше адрес.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат географических наук



Белоновская
Елена Анатольевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования

Арктические и высокогорные геосистемы – наиболее уязвимые структурные компоненты географической оболочки. В связи с современными климатическими изменениями в последние десятилетия значительно активизировались исследования высокогорных геосистем в целом и отдельных их компонентов в частности. В настоящее время на Алтае наблюдается устойчивая тенденция деградации ледников, которые служат регуляторами гидрологического режима рек на обширных прилегающих территориях. В результате деградации оледенения могут снизиться водозапасы и произойти аридизация территории, что и вызывает в настоящее время беспокойство многих учёных. Однако запасы льда есть не только в ледниках: на Алтае широко распространены каменные глетчеры.

Большая часть активных каменных глетчеров (т.е. содержащих лёд и продолжающих его накапливать) приурочена к наиболее высоким хребтам Алтая – Катунскому, Северо-Чуйскому и Южно-Чуйскому. Каменные глетчеры являются индикаторами распространения многолетнемерзлых пород. Если активные в настоящее время образования свидетельствуют об условиях многолетнего промерзания, то древние, потерявшие активность, т.е. способность к движению, указывают на существование многолетней мерзлоты в период их формирования. Знание этого позволяет реконструировать климат прошлых геологических эпох.

Каменные глетчеры могут оттеснять русла горных рек к противоположному склону долины и образовывать подпрудные озера. Это нередко приводит к возникновению селеопасных ситуаций.

В настоящее время сложился комплекс факторов, предопределивших возможность активизации исследований в высокогорных областях: развитие дистанционных методов (появление в широком доступе космических снимков высокого разрешения и развитие БАС); развитие ГИС-технологий; развитие геофизических методов; развитие высокоточных геодезических методов (GNSS-технологии) и др.

Выявление каменных глетчеров необходимо для исследования водозапасов территории, при составлении и уточнении региональных тематических карт (геоморфологической, ландшафтной, палеогеографической и пр.), для реконструкции развития территории; их расположение необходимо учитывать в территориальном планировании, при строительстве дорог и трубопроводов, при проектировании туристических маршрутов и выборе мест для строительства туристических баз.

Объектом исследования являются каменные глетчеры Центрального Алтая. Каменные глетчеры представляют собой скопления сцементированного льдом грубообломочного материала в горах, по форме напоминающее ледники, и обладающее способностью к самостоятельному вязко-пластическому течению под действием силы тяжести (Горбунов, 1988, с изменениями). Данные образования содержат достаточно большое количество грунтового льда, но гораздо менее подвержены климатическим изменениям в сравнении с ледниками.

Предметом исследования выступают география распространения, условия и факторы формирования каменных глетчеров.

Цель исследования: выявление закономерностей географии распространения, строения и генезиса каменных глетчеров Центрального Алтая.

Задачи исследования:

1. Выполнить обзор и обобщить данные современных исследований каменных глетчеров;
2. Выявить условия и ведущие факторы формирования каменных глетчеров на территории Центрального Алтая;
3. Выработать и апробировать методики дешифрирования и каталогизации, выделения границ и определения активности каменных глетчеров;
4. Модифицировать и адаптировать для Алтая морфогенетическую классификацию каменных глетчеров;
5. Выполнить картографирование каменных глетчеров Центрального Алтая по данным ДЗЗ и выявить закономерности их распространения;
6. Выявить связь морфологии и внутреннего строения каменных глетчеров на ключевых участках с их генезисом.

Теоретическую и методологическую основу исследований составили труды отечественных и зарубежных ученых: Д. Барша (D. Barsch) и А.Е. Корте (A.E. Corte), заложившие основу масштабных исследований каменных глетчеров и содержащие первые классификации данных образований; А.П. Горбунова, с обзором распространения каменных глетчеров по всему миру; исследователей, входящих в рабочую группу по инвентаризации каменных глетчеров (RGIC); А.А. Галанина, фс региональным обзором каменных глетчеров северо-востока России; Н.Н. Михайлова и О.В. Останина, посвященные исследованию каменных глетчеров Алтая, в т.ч. скорости их движения и температуры подповерхностных слоёв; В.В. Оленченко, посвященные геофизическим исследованиям каменных глетчеров Алтая, и других исследователей.

Методы исследований: в работе использовались обзорно-аналитический, сравнительно-географический, математико-статистический, полевой и картографический методы; для выявления внутреннего строения, а также таксономической принадлежности объектов использовались геофизические методы исследования. Аэрокосмический (дистанционный) метод был основой выявления, картографирования и каталогизации каменных глетчеров. Для получения детальных сведений о морфологии каменных глетчеров на локальных участках использовался метод аэрофотосъёмки. Оценка площадей и морфометрических характеристик каменных глетчеров выполнена с помощью стандартных вычислительных алгоритмов пакета ArcGIS 10. Использование геоинформационных технологий позволило свести всю полученную информацию в единую систему знаний о каменных глетчерах данного региона.

Научная новизна:

- Впервые создана региональная морфогенетическая классификация каменных глетчеров Алтая. Разработанная на основе анализа местоположения, морфологии и эволюции более 3000 объектов, она представляет собой уточненную и адаптированную для Алтая версию классификации каменных глетчеров Дитриха Барша.

- Впервые на основе картографических материалов проведен географический анализ каменных глетчеров Центрального Алтая и выявлена степень их сопряженности с гипсометрическими, геоморфологическими, геологическими, тектоническими, климатическими и палеогеографическими условиями. Выявлено, что исследуемые образования встречаются на высотах от 1278 до 3185 м н.у.м., а средняя высота их расположения зависит от абсолютной высоты днищ долин, количества атмосферных осадков и высоты расположения фронтов ледников.

- Впервые на основе геофизических методов исследования проведено сравнение внутреннего строения каменных глетчеров в высокогорной и среднегорной области. Выявлено, что и активные, и неактивные каменные глетчеры в высокогорных областях содержат большее количество льда, чем расположенные в среднегорье.

Защищаемые положения:

1. На территории Центрального Алтая преобладают каменные глетчеры, относящиеся к криогенным потокам. Они распространены в более широком высотном диапазоне, чем гляциогенные потоки. Фронтальные части активных криогенных потоков опускаются на 800-1000 м ниже языков ледников.

2. Средняя высота распространения каменных глетчеров повышается с запада на восток Центрального Алтая: у криогенных потоков – с 2250 м до 2730 м – вслед за увеличением абсолютной высоты днищ долин и уменьшением количества осадков, у гляциогенных потоков – с 2310 м до 2890 м – вслед за увеличением абсолютной высоты фронтов ледников.

3. Внутреннее строение криогенных потоков в высокогорьях и среднегорьях различается: в высокогорье в них преобладает ледяной материал, а в среднегорьях – каменный материал; экспозиционная приуроченность объектов практически не влияет на льдистость, но отражается на глубине залегания каменно-ледяных ядер каменных глетчеров.

Теоретическая и практическая значимость: выявление и каталогизация каменных глетчеров актуальна для расширения представлений об эволюции и динамике высокогорных геосистем. Установление области распространения активных форм каменных глетчеров способствует уточнению границ распространения многолетней мерзлоты.

Исследование внутреннего строения каменных глетчеров несёт как фундаментальное, так и практическое значение, поскольку позволяет не только установить условия формирования данных форм рельефа и уточнить их таксономическую принадлежность, но и приблизиться к оценке водозапаса территории.

Выявление каменных глетчеров актуально для целей территориального планирования; необходимо учитывать их при строительстве дорог и трубопроводов, прокладке электросетей и возведении сооружений в высокогорных областях.

Созданный ГИС-проект «Каменные глетчеры Центрального Алтая» обобщает информацию о данных формах рельефа, содержит их описание и даёт представление о географии их распространения. Он может служить основой для составления крупномасштабных геоморфологических и ландшафтных карт.

Личный вклад автора. Результаты, представленные в исследовании, получены автором самостоятельно. Автором выполнено визуальное дешифрирование данных ДЗЗ, и на его основе, на территории Центрального Алтая, выявлено и описано 3180 каменных глетчеров. Результаты дешифрирования обобщены в ГИС-проекте «Каменные глетчеры Центрального Алтая» (на платформе ПО ArcGIS). Созданы точечные и полигональные слои, отображающие положение исследуемых образований. Атрибутивная информация этих слоев содержит данные о географических координатах расположения объекта, высоте расположения фронтального уступа над уровнем моря, площади, экспозиции, геоморфологической позиции в пределах долины, морфологии поверхности, гранулометрическом составе обломочного чехла, форме и комплексности, динамической активности и наличии разновозрастных генераций.

В 2010-2025 гг. автором были проведены полевые исследования на территории Центрального Алтая, в ходе которых исследовалась морфология, динамика, внутреннее строение отдельных каменных глетчеров.

В 2018-2020 гг. автор руководила грантом РФФИ № 18-35-00463_мол_а «Исследование внутреннего строения гляциально-мерзлотных каменных образований Алтая на основе геофизических методов» в рамках которого были проведены детальные исследования внутреннего строения различных типов каменных глетчеров в среднегорных и высокогорных областях, а также проведена аэрофотосъёмка объектов на ключевых участках с целью детального изучения их морфологии.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на конференциях и семинарах регионального, всероссийского и международного уровня, в том числе на XXXIII Пленуме Геоморфологической Комиссии РАН (Саратов, 2013); на международной научной конференции «Развитие регионов в XXI веке (Владикавказ, 2013); на международных молодежных школах-семинарах «Ломоносовские чтения на Алтае» (Барнаул, 2013, 2014); на международной конференции «Ресурсы и риски регионов с мерзлотой» в рамках Всемирного форума снега (Новосибирск, 2014); на Европейской конференции по мерзлотоведению (Эвора, Португалия, 2014); на XVI гляциологическом симпозиуме (Санкт-Петербург, 2016); на пятой конференции геокриологов России (Москва, 2016); на Полярной конференции и Гляциологическом симпозиуме (Сочи, 2018); на международной научной конференции «Природные условия, история и культура Западной Монголии и сопредельных регионов» (Барнаул-Ховд, 2018); на международной научно-практической конференции «Современные исследования в науках о Земле: ретроспектива, актуальные тренды и перспективы внедрения» (Астрахань, 2019), на международной научно-практической конференции «Трансграничные регионы в условиях глобальных изменений: современные вызовы и перспективы развития» (Горно-Алтайск, 2019), на Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения А.А. Земцова «Геоморфология и физическая география Сибири в XXI веке» (Томск, 2020); на международной научно-практической конференции, посвященной 85-летию со дня рождения В.С. Ревякина «Географические исследования Сибири и Алтае-Саянского трансграничного региона» (Барнаул, 2021), на Шестой конференции геокриологов России «Мониторинг в криолитозоне» (Москва, 2022); на международной научно-практической конференции «Большой Алтай. Горы

и люди» (Горно-Алтайск, 2024), на Десятом ежегодном семинаре Сибирской Сети по изучению изменений окружающей среды SecNet, проходившем в рамках III Международного форума ассоциаций и консорциумов северных территорий (Томск, 2025).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 36 работ, в том числе 4 научные статьи в журналах, рекомендованных ВАК (из них 3 – входящих в RSCI), 5 научных статей в изданиях, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science, одна монография, 11 научных статей в изданиях, включенных в РИНЦ; зарегистрировано четыре базы данных.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений, списка использованной литературы и источников (117 наименований, из которых 38 на иностранном языке) и девяти приложений. В тексте работы содержится 57 графических иллюстраций и 1 таблица. Объем диссертации составляет 130 страниц.

Благодарности

Автор выражает благодарность научному руководителю к.г.н., доценту Останину Олегу Васильевичу за многолетние консультации и помощь в проведении полевых исследований, сотрудникам ИВЭП СО РАН Черным Дмитрию Владимировичу и Бирюкову Роману Юрьевичу за предоставление геофизического оборудования и помощь в проведении геофизических исследований, сотрудникам ИНГГ СО РАН Оленченко Владимиру Владимировичу, Потапову Владимиру Владимировичу, Шеину Александру Николаевичу за предоставление геофизического оборудования, а также за помощь в проведении геофизических исследований и анализе полученных данных.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Глава 1. Каменные глетчеры: основные представления

В данной работе единым термином «каменный глетчер» объединяются такие понятия как «debris rock glaciers» и «talus rock glaciers», используемые рядом ученых (Barsch, 1996; Corte, 1987 и др.).

Чтобы исключить путаницу терминологий и подчеркнуть генезис различных типов каменных глетчеров, объекты, имеющие непосредственную генетическую связь с современным оледенением (сформированные из мёртвого льда и моренного материала) в данной работе обозначены термином «гляциогенный поток», а объекты, сформированные из осыпного материала и сцементировавшего его льда – «криогенный поток».

К гляциогенным потокам (синонимы: ледниковые или приледниковые каменные глетчеры, каменные ледники, rock glaciers, debris rock glaciers, ice-cemented rock glaciers) относятся лопастевидные и языкообразные образования, состоящие из мерзлого щебня и глыб, сцементированных льдом, включающие ледяные линзы или ядра льда (Горбунов, 1989) и имеющие непосредственную связь с современным оледенением. При деградации оледенения, в конечном итоге они могут перейти в разряд каменных глетчеров смешанного генезиса, когда ледниковый лёд будет замещен вторичным инфильтрационным, если ход природного процесса не будет нарушен активизацией оледенения. Гляциогенные потоки, как правило, располагаются в верховьях основных и боковых долин, в цирках и карах их боковых отрогов.

Криогенные потоки (синонимы: присклоновые, перигляциальные каменные глетчеры, talus rock glaciers, rock flow, ice-cored rock glaciers) не связаны с оледенением и являются исключительно мерзлотными образованиями. Обломочный материал таких объектов имеет преимущественно осыпное, лавинно-осыпное и обвальное происхождение, а лёд образуется в результате замерзания в каменной толще талых и дождевых вод и попадания в неё снега. Как правило, они формируются у подножия склонов горных долин, иногда в древнеледниковых цирках и карах в результате преобразования осыпей и обвалов под влиянием мерзлотных деформаций. Языки криогенных потоков спускаются в днища долин, где чаще всего расширяются.

Криогенные потоки принципиально отличаются от гляциогенных потоков по внутреннему строению и способу питания, но могут иметь сходные черты в своём развитии. Так, например, при деградации оледенения, лёд в гляциогенных потоках может постепенно замещаться с глетчерного на мерзлотный (Михайлов, 2004). В этом случае, а также в случае слияния в единое образование гляциогенного и криогенного потока правомерно утверждать существование промежуточной формы: каменных глетчеров смешанного генезиса.

Немаловажным и открытым до сих пор остается вопрос о связи каменных глетчеров, в частности криогенных потоков, с иными формами мерзлотного рельефа, в особенности с курумами. Не смотря на мнение отдельных авторов, которые предполагают генетическую связь курумов и каменных глетчеров, выделяя отдельный тип переходных образований – курумоглетчеры (Романовский и др., 1989), в данной работе они рассматриваются как самостоятельные, не связанные формы рельефа, ввиду существенных различий в типе их движения, формы питания, морфологии и строения в целом.

Результаты собственных полевых наблюдений и анализ литературных данных о каменных глетчерах в различных горных странах (Кавказ (Володичева, 2004); Тянь-Шань (Тараканов, 1988); горы Северо-Востока России (Галанин, 2009); Алтай (Заморуев, 1963; Ивановский, 1981) и пр.) показали, что для их образования необходимы определенные условия: значительные скопления обломочного материала, поступающего к подножьям горных склонов или ледниковых долин и каров; уклон поверхности крутизной более 10°; низкие среднегодовые температуры, обеспечивающие сохранение в рыхлых толщах ледяного ядра или льда-цемента (Володичева, 2004). К положительным факторам, способствующим формированию каменных глетчеров различных типов, можно отнести современную тектоническую нестабильность и сейсмическую активность, которые способствуют разрушению и дроблению горных пород, деградацию оледенения, значительные годовые и суточные амплитуды температур.

Генезис каменных глетчеров является одним из самых спорных вопросов с момента начала изучения данных образований и по сей день. В настоящее время имеются две равноправные гипотезы их происхождения: а) конец горного ледника, погребенный под мореной (отчленившийся от основного потока и продолжающий самостоятельное движение); б) самостоятельное образование, возникающее в результате накопления обломков (из камнепадов, осыпей) и льда (из лавинного снега, талой и дождевой воды) (Глазовский, 1978; Горбунов, 2011 и др.).

Основными составляющими внутреннего строения каменных глетчеров является обломочный материал (моренный или коллювиальный) и лед. Содержание обломков породы и льда меняется в зависимости от происхождения и развития каменных глетчеров; гранулометрический состав твердокаменного материала в разных частях и в разных типах каменных глетчеров также неодинаков.

В строении каменных глетчеров одинаково важны твердокаменный материал и лед. Лед связывает обломки горных пород и придает вязко-пластичные свойства каменноледяной массе, а твердокаменный материал предохраняет его от таяния. В противном случае каменные глетчеры не существовали бы и не зарождались ниже ледников. Фронтальные части долинных и склоново-долинных каменных глетчеров располагаются часто ниже языков ледников на 300-1000 м.

Сопоставление схем позднеплейстоценовых оледенений (Окишев, 2011) с точками расположения каменных глетчеров показало, что существенная часть криогенных каменных глетчеров Алтая располагается на территориях, занятых ещё 13-14 тыс. лет назад ледниками, что подтверждает мнение исследователей о том, что они сформировались преимущественно в голоцене.

Глава 2. Методы и методики исследования

Для исследования каменных глетчеров Центрального Алтая применялся широкий спектр методов – от традиционных геоморфологических (морфографический, морфометрический, морфоструктурный и др.), до новейших междисциплинарных (геофизический, геодезический, дистанционный, геоинформационный).

В ходе изучения и описания каменных глетчеров применялись полевые, камеральные и смешанные методы геоморфологических исследований. Во время полевых исследований проводились маршрутно-экспедиционные работы: визуальное наблюдение, геодезические измерения, а также дистанционные исследования внутреннего строения и морфологии поверхности каменных глетчеров и прилегающих территорий, которые включали в себя применение геофизических методов и аэрофотосъемки.

Методы геоморфологических исследований. В качестве основных в работе использовались морфометрический и морфологический методы исследования.

Морфометрический метод позволяет получить характеристику высот (абсолютных и относительных), уклон поверхности и фронтального уступа, площадь каменных глетчеров. Морфологический метод дает характеристику внешних особенностей данных образований и их расположения относительно вмещающих их форм рельефа: геоморфологическую позицию в пределах долины, морфологию поверхности, сложность образования, форму в плане. Совместное использование генетического, морфоструктурного и палеогеоморфологического методов с дистанционным и геофизическим методами позволяет установить тип каменных глетчеров, гранулометрический состав обломочного чехла, современную динамическую активность данных форм рельефа, наличие или отсутствие в них ледяного ядра, а также единовременность их формирования, и установить совокупность факторов, приведших к формированию данных форм рельефа на исследуемой территории.

Дистанционный метод, в том числе аэрофотосъемка. Выявление, картографирование и описание каменных глетчеров базировалась главным образом на дистанционном методе – дешифрировании космических снимков (ALOS, RapidEye, Sentinel-2, Landsat-5, 7, 8) и изображений (полученных с помощью ПО «SASPlanet», «Google Earth Pro» и «ArcGIS Earth»). Данный подход обусловлен значительной площадью исследуемой территории, труднодоступностью многих её участков, а также обширным распространением исследуемых объектов.

Помимо спутниковых данных ДЗЗ в работе использовались материалы аэрофотосъемки с БПЛА. В результате были получены ортофотопланы и цифровые модели рельефа с разрешением 5-15 см в пикселе, а также изолинейные карты ключевых участков, что позволило провести детальные исследования морфологии каменных глетчеров.

Геодезический метод. Высокоточная геодезическая съемка (GNSS-съемка приемником Leica GS08 plus) была использована для построения поперечных и продольных профилей каменных глетчеров, привязки геофизических профилей и повышения точности геопозиционирования аэрофотосъемки.

Для выявления динамики активных каменных глетчеров были выбраны ключевые участки в высокогорной и среднегорной области. Перед фронтом выбранных каменных глетчеров были установлены неподвижные реперы, а на их поверхности было отмечено (промаркировано) по 20-25 опорных точек. При помощи тахеометрической съемки и GNSS-съемки были определены их координаты. Полученные к настоящему времени результаты позволяют предположить, что скорость их течения не превышает первых сантиметров в год. Повторные исследования позволяют в перспективе уточнить скорости течения каменных глетчеров Алтая.

Геофизический метод. Каменные глетчеры состоят преимущественно из крупноглыбового обломочного материала, что затрудняет исследование их внутреннего строения с помощью бурения или заложения шурфов. Решением в данной ситуации было использование геофизических методов, в частности электротомографии, для получения данных о внутреннем строении исследуемых образований. Исследования проводились с помощью многоэлектродной электроразведочной станции «СКАЛА-48». Обработка и анализ данных выполнялся с помощью программного обеспечения Siber Tools, Res2Dinv, Voxler. В результате зондирования получены геоэлектрические разрезы каменных глетчеров, позволяющие делать выводы о глубине залегания и мощности каменно-ледяных ядер каменных глетчеров, а также о соотношении ледяного и каменного материала в них.

Геоинформационный метод. Использование ГИС позволило не только обобщить имеющиеся данные, провести дешифрирование и оцифровку каменных глетчеров, но и получить систематизированные данные об их местоположении (географических координатах), высоте над уровнем моря, экспозиции, уклоне поверхности и др.

При изучении, описании и каталогизации каменных глетчеров Центрального Алтая были разработаны и апробированы приведенные ниже методики.

Методика дешифрирования каменных глетчеров. К основным морфологическим признакам каменных глетчеров были отнесены следующие: подковообразная выпуклая натечная форма, фронтальный уступ, заканчивающийся осыпным шлейфом, напорные и ударные валы у его основания, натечные ступени, придающие характерный ложбинно-

грядовый рельеф, наличие во фронтальной их части множества ручьев и ключей.

На основе прямых дешифровочных признаков выявлялись: местоположение в долине, морфология поверхности, гранулометрический состав обломочного чехла, форма и комплексность, количество генераций; по косвенным признакам определялся тип образования, его динамическая активность и наличие ледяного ядра.

Методика выделения верхних границ каменных глетчеров. При выделении верхних границ *криогенных потоков* используются следующие основные признаки:

– угол наклона поверхности: осыпной склон обычно имеет более крутой уклон, нежели тело криогенного потока;

– гранулометрический состав обломков: т.к. происходит изменение уклона поверхности, то соответственно изменяется и гранулометрический состав поверхностных отложений – на теле осыпи обломки будут мельче, чем на поверхности криогенного потока;

– лишайниковый покров: т.к. обломочный материал на поверхности криогенного потока более стабилен, он успевает покрыться лишайниковым покровом, и ввиду этого цвет каменного материала отличается от цвета осыпи.

При выделении верхних границ *гляциогенных потоков* используются следующие основные признаки:

– выпуклая поверхность гляциогенного потока: в отличие от конечной или боковой морены, имеющей вогнутую со стороны ледника форму, гляциогенные потоки имеют выпуклую форму;

– лишайниковый покров: в случае, если гляциогенные потоки сформировались раньше, чем современные моренные комплексы, они будут существенно больше освоены лишайниками, и соответственно будут отличаться по цвету.

Методика определения активности каменных глетчеров. Индикаторами активности являются: хорошо выраженный осыпной фронтальный уступ; незадернованная или слабозадернованная поверхность каменных глетчеров; наличие ручьев и ключей в прифронтальной области; заболоченная прифронтальная область; хорошо выраженные поперечные и продольные гряды и ложбины (не для всех образований).

Глава 3. Природные условия формирования каменных глетчеров Центрального Алтая

На распространение и строение каменных глетчеров в различной степени оказывают влияние: геологические и геоморфологические условия (наличие тектонических разломов, общий характер рельефа, распространение и петрографический состав рыхлообломочных отложений, абсолютная и относительная высота хребтов и днищ долин, уклоны поверхности и др.), климатические условия (степень континентальности климата, количество осадков по сезонам года), гидрологические условия (близость рек, ручьев, характер залегания и выходы подземных вод), распространение древнего и современного оледенения, и многолетней мерзлоты.

Горный Алтай – это часть Алтае-Саянской горной страны, обширная территория, располагающаяся между 85° и 89° в.д., и 49° и 51° с.ш. Центральный Алтай является частью Горного Алтая; в нее входят наиболее высокие хребты: Катунский, Южно-Чуйский и Северо-Чуйский. В данной работе рассматривалась территория Центрального Алтая в границах России.

Хребты Центрального Алтая характеризуются ассиметричным строением – южные склоны крутые с выпуклым профилем, а северные – более пологие и сглаженные, с многочисленными длинными отрогами. Склоны гор расчленены глубокими троговыми долинами и изъедены карами, иногда вложенными друг в друга и образующими несколько ступеней. Днища каров, в которых нет современных ледников, часто заняты озерами и криогенными потоками. Особенно ярко ассиметричность проявлена на Южно-Чуйском хребте, где она находит отражение в распространении каменных глетчеров: на южном макросклоне хребта четко выделяется пояс распространения каменных глетчеров – на высотах 2300–3000 м н.у.м.

Высота днищ долин Центрального Алтая повышается при продвижении с запада на восток. Так, средняя высота днищ долин Катунского хребта колеблется в пределах 1200–1600 м н.у.м., западной оконечности Северо-Чуйского и Южно-Чуйского хребтов – в пределах 1500–1800 м н.у.м., а на их восточных оконечностях поднимаются до 2100–2400 м н.у.м., что закономерно

отражается на средних высотах расположения каменных глетчеров.

Широкое распространение на территории Центрального Алтая гранитоидов и других пород, при разрушении которых образуются крупные обломки – глыбы – способствует широкому развитию каменных глетчеров на данной территории.

Климатические условия Центрального Алтая благоприятны для развития многолетнемерзлых пород. Континентальность климата возрастает при продвижении с севера и запада на восток, юго-восток, что влияет на среднюю высоту расположения каменных глетчеров. На особенности радиационного режима и циркуляцию воздушных масс над Алтаем оказывают существенное влияние орографические условия. Большое влияние на формирование микро- и мезоклиматов оказывают экспозиционные различия склонов и форм рельефа по отношению к солнцу и преобладающим ветрам. К этому следует добавить влияние положения хребтов в системе горной страны, их расчлененность, высоту и т.д., усложняющих картину климата исследуемой территории.

По расчетам В.В. Севастьянова (1998) среднее количество осадков, выпадающих в Центральном Алтае, составляет: на Катунском хребте – 1500 мм/год, на Северо-Чуйском хребте – 900 мм/год, а на Южно-Чуйском хребте – 700 мм/год. Но их распределение по региону весьма неравномерно; столь же неравномерно и распределение осадков по сезонам года. Так, преобладающее количество осадков выпадает в Центральном Алтае в теплое время года – в период с апреля по октябрь – более 80% годового количества осадков. Самым дождливым месяцем в регионе является июль (по данным: Всероссийский НИИ гидрометеорологической информации, 2025).

Территория Центрального Алтая характеризуется развитой гидрологической сетью; все реки региона относятся к трем крупным бассейнам: Верхней Катунь, Аргута и Чуи. Взаимодействие каменных глетчеров с реками характеризуется следующими аспектами:

- активные каменные глетчеры являются источниками воды; сток с них формирует ручьи, питающие реки региона;

- при определенных условиях (при залегании в узких долинах, со слабо выработанным профилем и малым количеством осадочных отложений в днище долины), реки могут протекать сквозь каменные глетчеры; в этом случае вероятнее всего происходит частичное замещение льда в теле каменного глетчера на тонкодисперсный материал, переносимый рекой. Это может повлиять на динамическую активность образования;

- языки каменных глетчеров, спускающиеся в широкие и плоские днища долин, формируют прифронтальный напорный вал, который может постепенно отеснять русло реки к противоположному склону долины. Это приводит к изменению русел рек, а иногда – к их подпруживанию и формированию озёр.

В высокогорных районах на питание подземных вод и их режим существенное влияние оказывает многолетняя мерзлота. В верховьях высокогорных рек надмерзлотные воды приурочены к рыхлым отложениям ледниковых морен и могут служить источником питания гляциогенных потоков. Межмерзлотные воды встречаются в виде линз и пластов, временно замороженных в рыхлых образованиях (Ресурсы..., 1969). Именно они зачастую становятся основой для формирования криогенных потоков.

Центральный Алтай – крупный район современного горного оледенения. По данным Каталога ледников СССР (1974) на территории Центрального Алтая (в границах России) выделялось 782 ледника общей площадью 651,1 км². Из них на Катунском хребте – 353 на Северо-Чуйском хребте – 203; на Южно-Чуйском хребте – 226. Преобладающее большинство ледников – каровые. По данным Каталога ледников России (2020) количество ледников на данной территории сократилось до 748, а их площадь уменьшилась на 241 км² (до 410,12 км²). Весьма вероятно, что эти площади не являются полностью утраченными, а были частично унаследованы гляциогенными потоками. Таким образом, можно сделать вывод, что порядка 40% ледников Центрального Алтая стали источником формирования гляциогенных потоков и каменных глетчеров смешанного генезиса. Высота расположения фронтов ледников – важный фактор, являющийся лимитирующим для максимальных высот расположения гляциогенных потоков. Для территории Центрального Алтая характерно существенное увеличение высоты расположения фронтов ледников с запада на восток: на 86° в.д. их средняя высота составляет

2500 м н.у.м., а на 88° в.д. – поднимается до 3100 м н.у.м.

Древнее, плейстоценовое, оледенение наложило отпечаток на рельеф, сформировав кары и цирки, в которых активно развиваются современные каменные глетчеры. Выявлено, что всего 1,5% каменных глетчеров Центрального Алтая сформировались на территориях, не затронутых позднплейстоценовым и голоценовым оледенением.

На строение мерзлой толщи в данном регионе существенное влияние оказывают активный гидрогеологический режим и повышенный тепловой поток в зонах тектонических нарушений. Также строение многолетнемерзлых пород (далее – ММП) зависит от величины снежного покрова и экспозиции склона. Каменные глетчеры являются в определенной степени индикаторами распространения ММП, хотя ареал распространения неактивных форм может опускаться ниже нижних границ современного распространения многолетней мерзлоты.

Глава 4. Региональная классификация и каталогизация каменных глетчеров Алтая

Каталогизация каменных глетчеров Алтая привела к необходимости дополнения существующих классификаций и адаптации их для территории исследования (рис. 1).

Согласно представленной классификации, **криогенный поток** представляет собой форму рельефа, сформированную из скопления коллювиальных отложений, сцементированных льдом преимущественно неледникового происхождения, и обладающую способностью к самостоятельному движению под действием силы тяжести.

Гляциогенный поток – это форма рельефа, сформированная из моренных отложений, включающих ледяные линзы или ядра льда гляциального происхождения, обладающая способностью к самостоятельному движению под действием силы тяжести, и имеющая непосредственную *генетическую* связь с современным оледенением.

Каменные глетчеры смешанного генезиса формируются при слиянии гляциогенных и криогенных потоков или же при деградации оледенения, когда классический ледник, питавший гляциогенный поток, исчезает, и в теле данного образования гляциальный лед начинает постепенно замещаться конжеляционным, инъекционным, и некоторыми другими типами льда, а источником каменного материала, помимо морен, выступает коллювий, который поступает на поверхность каменного глетчера смешанного генезиса из осыпей, обвалов и камнепадов.

По геоморфологической позиции в пределах долины выделяются каменные глетчеры:

– берущие начало в верховьях долины – ледниковом цирке: корневые части этих образований могут питаться материалом со склонов различных (2 и более) экспозиций, а языки спускаются в днище долины;

– расположенные в древнеледниковом каре: располагаются у подножия и питаются обломочным материалом со стенок кара; материал поступает со склонов различных (2 и более) экспозиций;

– приуроченные к борту долины: преимущественно мелкие по площади, серповидной формы образования, характерной чертой которых является длинный осыпной шлейф переднего фронта; похожи на ласточкины гнезда – формируются в незначительных нишах или микрокарах (невыработанных карах) на крутых склонах долин;

– расположенные у подножия склона (присклоновые): занимают положение на стыке (перегибе) крутого осыпного склона и относительно пологого днища долины; их ширина часто превышает их длину; материал поступает со склона одной экспозиции; часто сливаются, образуя комплексные каменные глетчеры;

– сформированные в днище долины: для данных образований характерно превышение длины над шириной, рельеф их поверхности преимущественно хорошо выражен; каменный материал может поступать как с одного, так и с нескольких склонов долины;

– расположенные у переднего края ледника: данные образования в эмбриональном состоянии имеют серповидную форму, повторяющую форму конечного моренного комплекса, но даже на начальном этапе развития они чаще всего имеют четко выраженный характерный поверхностный рельеф; при длительном развитии данные образования могут занимать значительную часть днища долины, достигая длины в несколько километров;

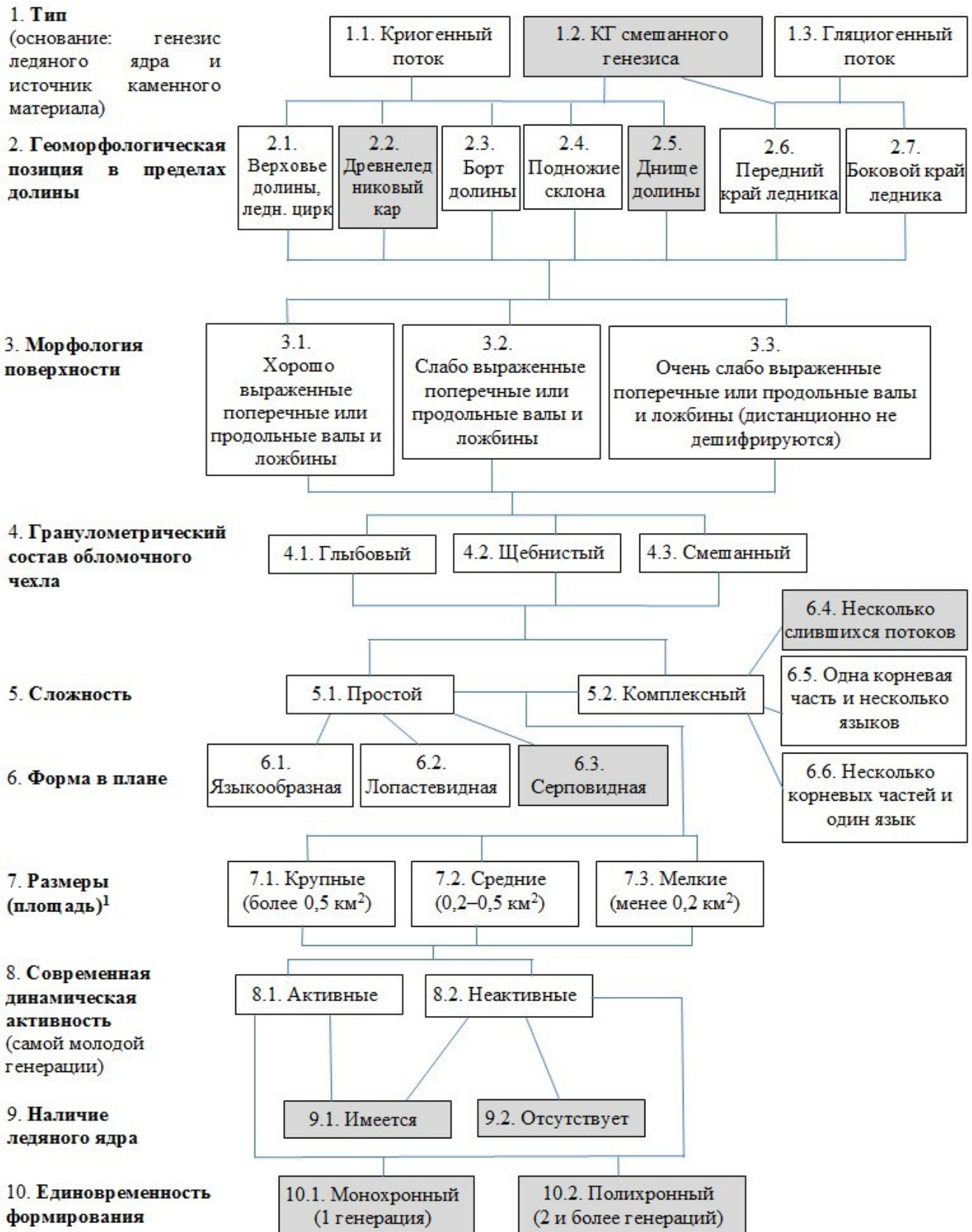


Рисунок 1. – Региональная морфогенетическая классификация каменных глетчеров Алтая, основанная на классификации Д. Барша (серым выделены отличные от классификации Д. Барша элементы);

¹ – Крупные: могут отображаться на среднемасштабных картах; средние – на крупномасштабных картах; мелкие – на планах

– расположенные у бокового края ледника: в Центральном Алтае встречаются очень редко; данные образования питаются за счет обломочного материала современных боковых морен ледника, и сохранившегося в них мертвого льда; и их площадь редко превышает 0,1 км²;

По сложности каменные глетчеры подразделяются на простые и комплексные; из этого вытекает такая их морфологическая характеристика как форма в плане. Комплексные каменные глетчеры подразделяются на образования:

– сформированные несколькими слившимися потоками (являются наиболее распространенной формой) – формируются чаще всего на протяженных, крутых, слаборасчлененных склонах троговых долин, преимущественно из криогенных потоков, располагающихся друг от друга настолько близко, что визуально отделить один наплыв от другого не представляется возможным;

– с одной корневой частью и несколькими языками (рис. 2) – довольно редкие образования, формирующиеся при наличии расчлененного рельефа (чаще всего – ригельных ступеней или курчавых скал) у подножий склонов, способствующего разделению потока на несколько языков;

– с несколькими корневыми частями и одним языком – приурочены, в основном, к близко расположенным карам, выходящим в узкую долину со значительным уклоном дна (рис. 3).

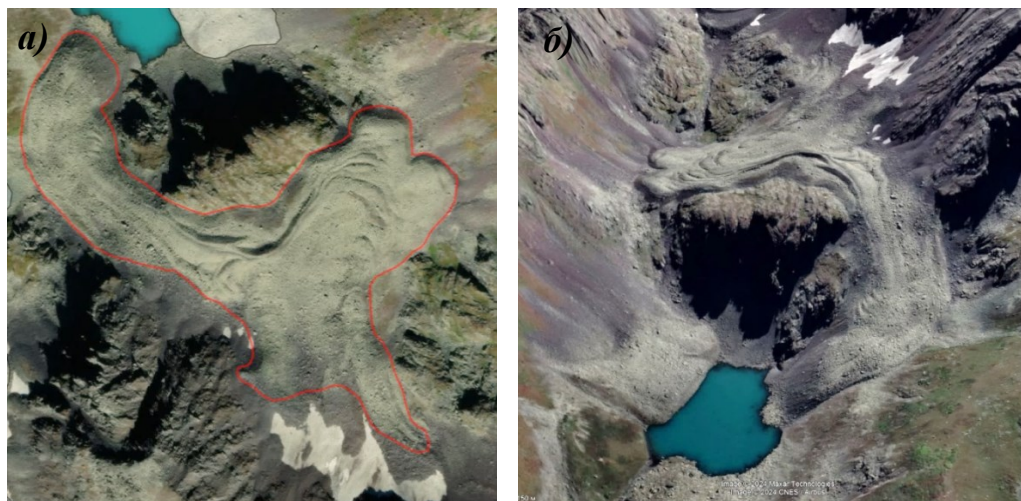


Рисунок 2. –
Комплексный
криогенный поток
с одной корневой и
несколькими
языковыми
частями на
Катунском хребте:
а) плановые
очертания;
б) объёмное
изображение

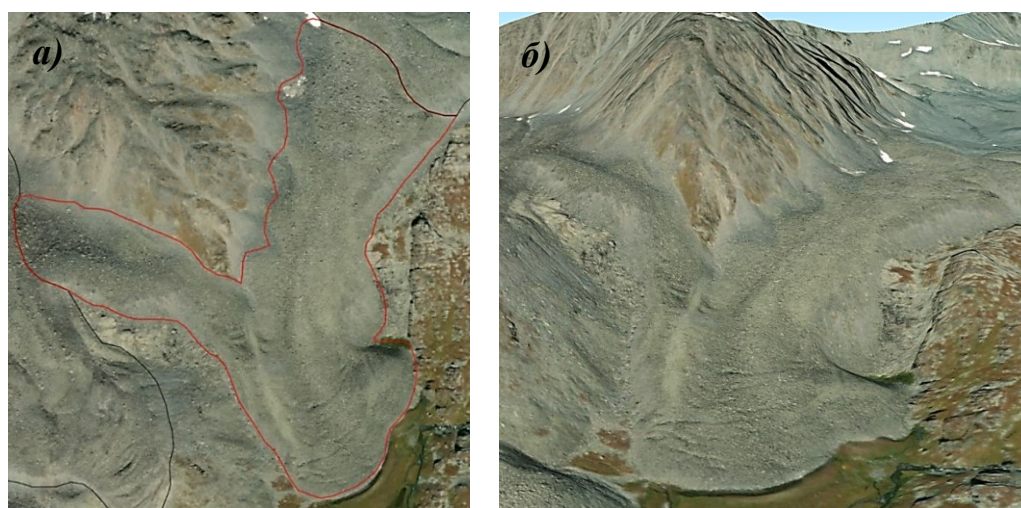


Рисунок 3. –
Комплексный
криогенный поток
с несколькими
корневыми
частями и одним
языком на Южно-
Чуйском хребте:
а) плановые
очертания;
б) объёмное
изображение

Единовременность формирования – данный генетический показатель характеризует наличие у каменного глетчера разновременных генераций. Одной генерацией предлагается считать один морфологически единый «наплыв» в теле каменного глетчера, сформированный в сходных климатических условиях. Друг от друга генерации отделяются сравнительно четко выраженными уступами. У каменных глетчеров на Алтае может насчитываться до 5 и более генераций, но только одна из них (самая верхняя и молодая) может быть активной в настоящее время.

Каталогизация

Для обобщения и структурирования информации, а также для получения морфометрических данных о каменных глетчерах, был создан ГИС-проект «Каменные глетчеры Центрального Алтая» (рис. 4). Выявленные каменные глетчеры представлены в проекте в виде двух слоёв: точечного (предназначенного для определения координат расположения объектов, их высоты над уровнем моря, экспозиции) и полигонального.

Для определения типа каменного глетчера рассматривалось его положение в долине, положение по отношению к современному оледенению, характер питающего материала (осыпной/моренный). Для определения активности – наличие крутого незадернованного осыпного фронта, а также ручьев, ключей и заболоченных участков в прифронтальной зоне образования.

С помощью инструментов ПО ArcGIS автоматически определялись географические координаты расположения объектов, высота расположения фронтов каменных глетчеров над уровнем моря, их площадь и экспозиция.

Основой для каталогизации объектов послужили: космические снимки ALOS и RapidEye на часть территории Северо-Чуйского и Южно-Чуйского хребтов, Sentinel-2, Landsat-5, 7 и 8 на весь район исследования; данные, полученные с помощью ПО «SASPlanet», «Google Earth Pro» и «ArcGIS Earth», а также литературные материалы и материалы полевых исследований (2010-2024 гг.). Космические снимки использовались разновременные и разносезонные. Это позволило контролировать правильность выделения каменных глетчеров из-за разного отображения растительности, освещенности склонов на космических снимках, а также геоморфологической выраженности этих объектов на осенних и весенних снимках, за счет их «текстурирования» снежным покровом (ранним и «остаточным» – поздним весенним).

При выделении каменных глетчеров, за один объект принимался отдельный поток с четко выраженными границами, визуально отделяющийся от соседних образований.

Ключевым вопросом при картографировании было выделение границ гляциогенных и криогенных потоков. В ряде случаев проведение границы между осыпным конусом и телом криогенного потока, а также между погребенным «мертвым» льдом, конечным моренным комплексом и гляциогенным потоком было весьма условно, и базировалось на характеристиках лишайникового покрова и морфологии поверхности каменного глетчера.

Глава 5. Распространение, морфология и внутреннее строение каменных глетчеров Центрального Алтая

Активные формы каменных глетчеров преимущественно приурочены к высокогорьям Центрального Алтая. Гляциогенные потоки занимают высотный интервал от 1988 до 3134 м н.у.м., и все являются активными. Криогенные потоки встречаются в гораздо более широком интервале: от 1278 до 3185 м н.у.м. Во-первых, это объясняется тем, что они могут формироваться на склонах долин, и располагаться выше, чем языки ледников, питающих гляциогенные потоки. Во-вторых, наличие у них более мощного обломочного чехла и большего количества источников питания способствует их продвижению в более низко расположенные области.

К Катунскому хребту приурочено 1455 каменных глетчеров, общей площадью 134,5 км²; 1252 из них криогенные потоки, 101 – гляциогенные потоки, 102 – каменные глетчеры смешанного генезиса. К Южно-Чуйскому хребту приурочено 1016 образований, общей площадью 107,1 км²; 918 из них криогенные потоки, 64 – гляциогенные потоки, 34 – каменные глетчеры смешанного генезиса. К Северо-Чуйскому хребту приурочено 709 образований, общей площадью 70,9 км². Из выявленных образований: 643 – криогенные потоки, 51 – гляциогенные потоки, 15 – каменные глетчеры смешанного генезиса.

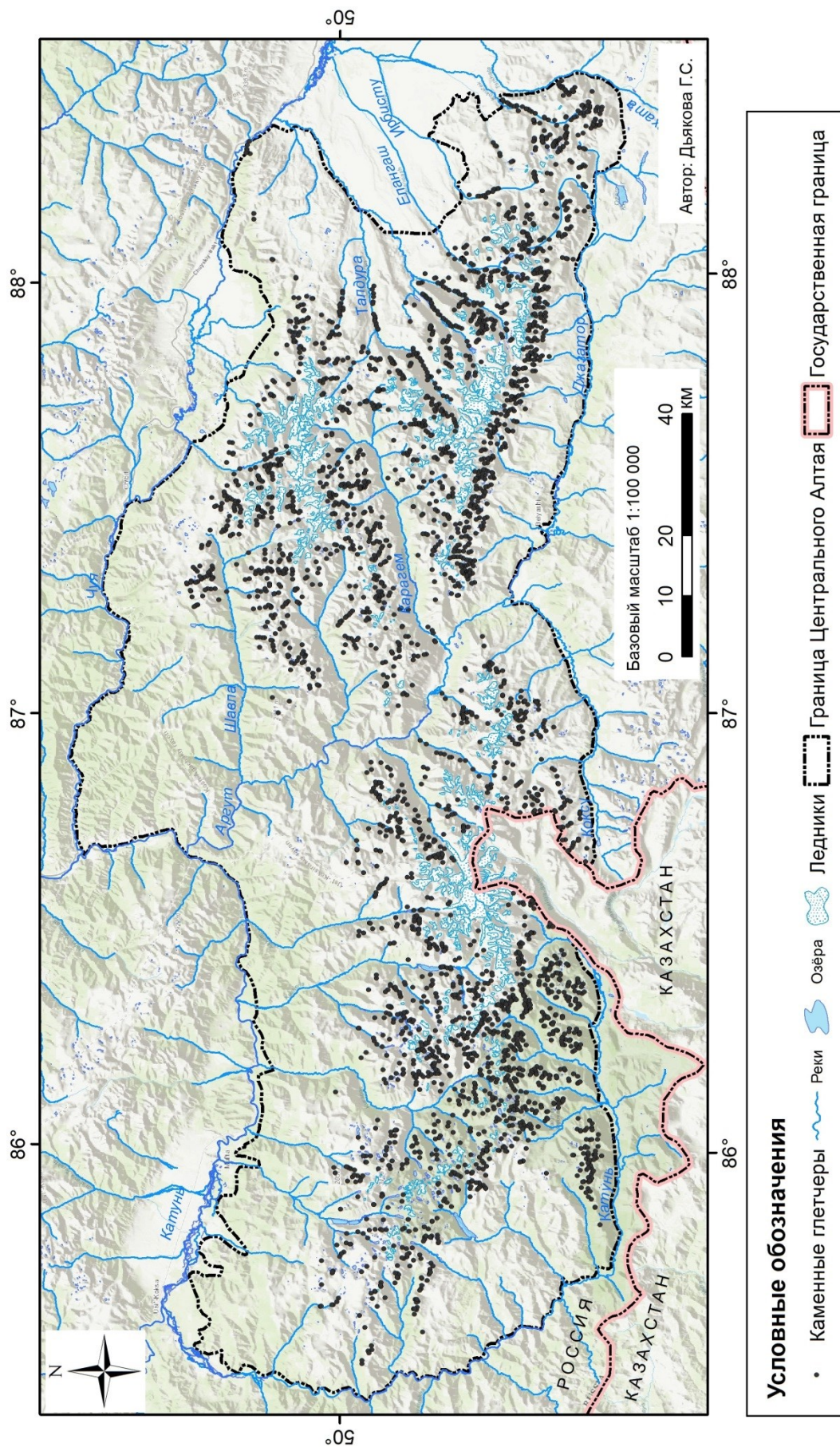


Рисунок 4. – Распространение каменных глетчеров на территории Центрального Алтая
(карта из ГИС-проекта)

При анализе средней высоты распространения каменных глетчеров было выявлено, что она имеет долготную зависимость, повышаясь с запада на восток. Особенно ярко это проявляется в высоте распространения гляциогенных потоков: корреляционная зависимость средней высоты их расположения от долготы местности составляет 0,7, что напрямую связано с высотой расположения фронтов ледников. На среднюю высоту расположения криогенных потоков влияют преимущественно орографический (абсолютная высота днищ крупных долин повышается с запада на восток с 1200-1600 до 2100-2400 м) и климатический фактор (среднее количество осадков с запада на восток понижается с 1500 до 700 мм). Также средняя высота расположения каменных глетчеров существенно зависит от экспозиции: на северном макросклоне языки криогенных потоков спускаются в среднем на 200 м ниже, а гляциогенных потоков – на 250-280 м ниже, чем на южном макросклоне. Сравнение высотного расположения нижних частей языков ледников и активных криогенных потоков показывает, что последние могут существовать на 800-1000 м ниже языков классических ледников, т.к. их обломочный чехол, мощностью более 3-5 м, способствует сохранению льда. Наибольший высотный диапазон распространения каменных глетчеров наблюдается на склонах юго-восточной экспозиции, где гляциогенные потоки встречаются на высотах от 2745 до 3071 м н.у.м., а криогенные потоки – от 1341 до 3185 м н.у.м.

В целом, рассматривая экспозиционную приуроченность каменных глетчеров Центрального Алтая (рис. 5), можно выявить следующие закономерности:

- гляциогенные потоки и каменные глетчеры смешанного генезиса тяготеют к склонам восточной экспозиции; немного уступают по количеству объектов северные и южные склоны; реже всего гляциогенные потоки формируются на склонах юго-западной и западной экспозиций;
- криогенные потоки тяготеют к северному макросклону; меньше всего их на склонах южной экспозиции.

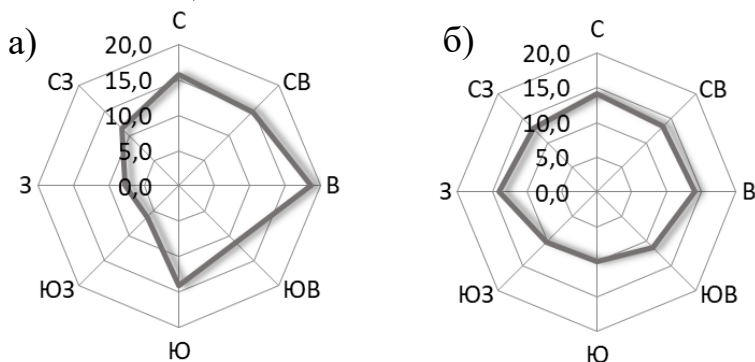


Рисунок 5. – Экспозиционная приуроченность каменных глетчеров Центрального Алтая (в процентах): а) гляциогенных потоков и образований смешанного генезиса; б) криогенных потоков

По местоположению большая часть каменных глетчеров приурочена к подножию склона, реже всего они формируются у боковых частей ледника (рис. 6).

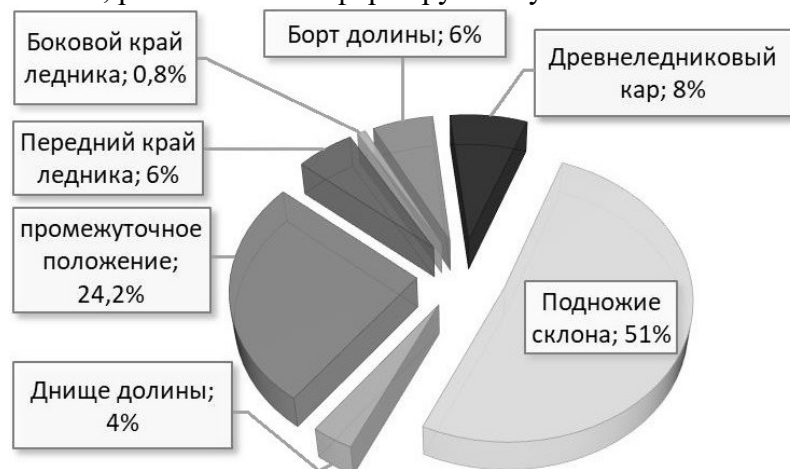


Рисунок 6. – Распределение каменных глетчеров Центрального Алтая по геоморфологической позиции в пределах долины (в %). Промежуточное положение – это расположение на стыке двух или более элементов рельефа

Более 35% каменных глетчеров Центрального Алтая имеют хорошо выраженный поверхностный рельеф (рис. 7).

Средняя площадь каменных глетчеров составляет 0,1 км², но вариативность данного

показателя весьма высока. Так, некоторые объекты могут достигать площади более $1,2 \text{ км}^2$, а некоторые быть площадью менее $0,002 \text{ км}^2$ (минимальная площадь каменного глетчера, выявленного в Центральном Алтае, составила $0,0012 \text{ км}^2$).

Длина исследуемых образований может достигать значительных размеров – 3-5 км. Таких же размеров они могут достигать и в ширину, протягиваясь вдоль подножия склонов на несколько километров. В некоторых долинах они создают внушительные комплексы: объекты располагаются вплотную друг к другу и тянутся вдоль склонов долины десятки километров.

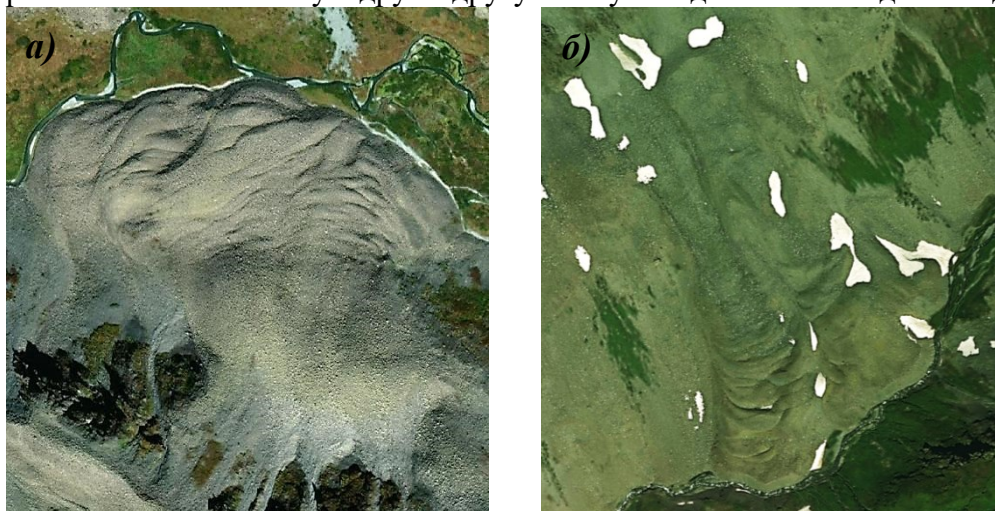


Рисунок 7. – Криогенные потоки на северном (а) и южном (б) макросклоне Катунского хребта (Картографический сервис ESRI)

Морфологические характеристики и внутреннее строение каменных глетчеров на ключевых участках

Изучение морфологии и внутреннего строения каменных глетчеров проводилось на нескольких ключевых участках (рис. 8). Детальное исследование морфологии проводилось на основе данных аэрофотосъёмки, выявление внутреннего строения – на основе геофизических исследований, преимущественно электротомографии. Громоздкость и энергозависимость геофизического оборудования сужало возможность выбора ключевых объектов исследования до находящихся в транспортной доступности. Поэтому на некоторых ключевых участках проводилось только исследование морфологии поверхности каменных глетчеров.

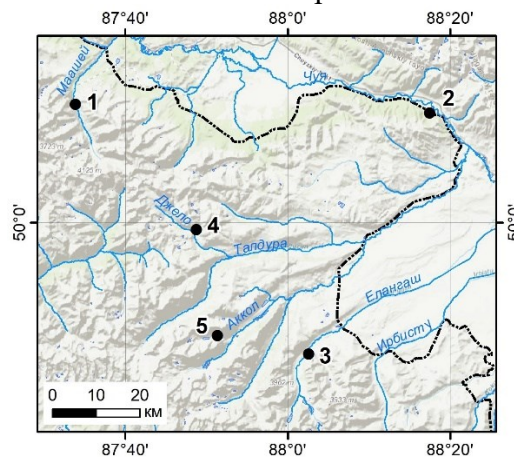
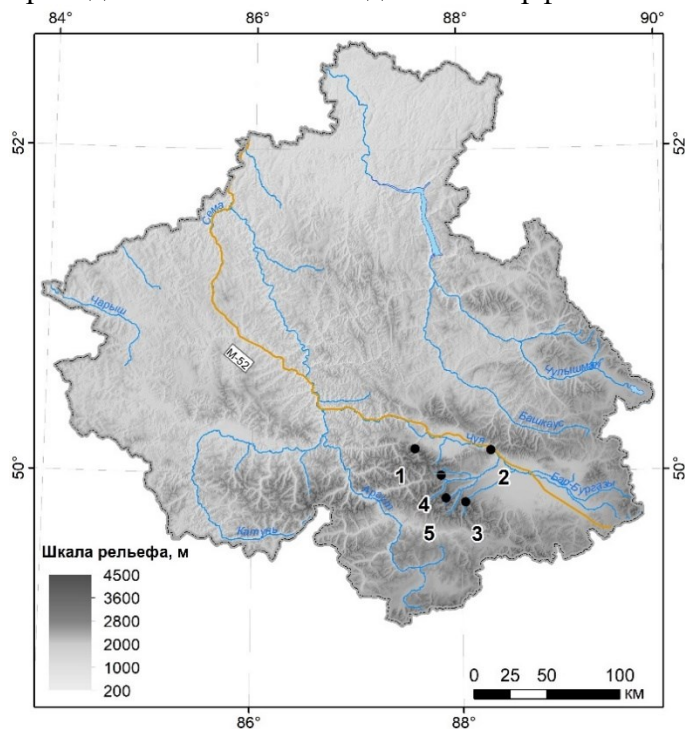


Рисунок 8. – Расположение ключевых участков на территории Республики Алтай: 1 – в долине р. Маашей; 2 – в долине р. Чуя (участок «Сукорский»); 3 – в долине р. Елангаи; 4 – в долине р. Джело; 5 – в долине р. Верхний Тураюк (участок «Аккол»)

– *Долина р. Маашей*

В долине р. Маашей, на основе данных аэрофотосъёмки произведенной в сентябре 2022 г., проводилось исследование морфологии криогенного потока, формирующего плотину оз. Маашей.

Маашейский каменный глетчер самый крупный из имеющихся в долине р. Маашей (Северо-Чуйский хребет). Располагается в 5,2 км вниз по долине от краевой части конечного моренного комплекса малого ледникового периода Маашейского ледника, на левом склоне долины, имеющем северо-восточную экспозицию.

Каменный глетчер изначально имел гляциогенный (Буланов, 2013) или смешанный (ледниково-осыпной) генезис, но в настоящее время ледник в верховьях полностью деградировал и, вероятнее всего, ледниковый лёд в образовании полностью замещён. В пользу этого говорит расположение кара, днище которого занимает верхняя часть каменного глетчера, в области, охваченной оледенением кочурлинской стадии, которая завершилась не позднее 5 тыс. лет назад (Алтайский край..., 1978; Окишев, 2011) в настоящее время исследуемое образование представляет собой криогенный поток, состоящий из двух основных частей, с разделяющей их осыпной транзитной зоной (рис. 9).

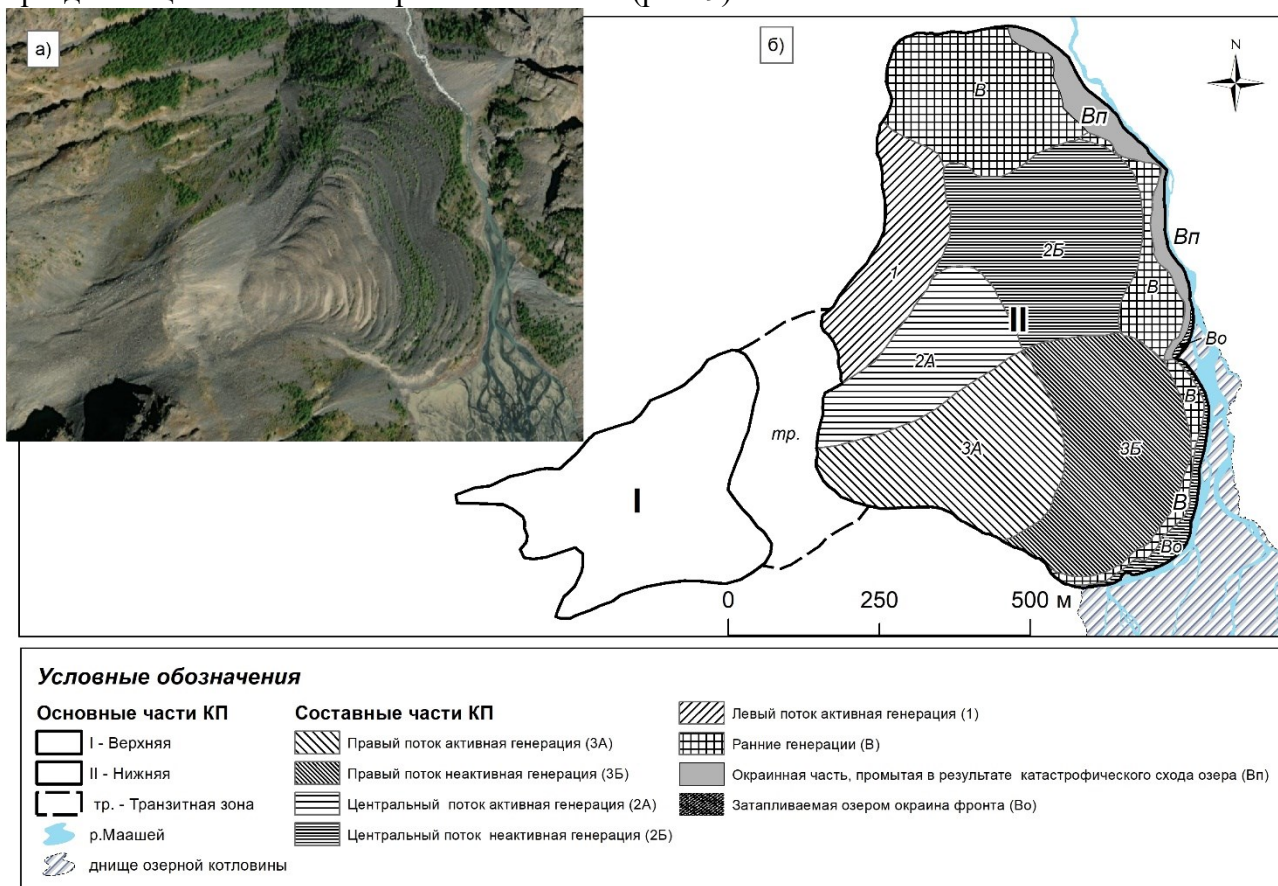


Рисунок 9. – Маашейский каменный глетчер: а) фрагмент космического снимка с картографического сервиса ArcGIS Earth; б) геоморфологическая схема

Верхняя часть (I) данного образования залегает в кара на высоте 2350-2250 м н.у.м. и имеет слабовыраженный поверхностный рельеф в виде продольных валов и ложбин. Кар не имеет современного оледенения.

Ниже устья кара выделяется **транзитная зона** (тр.) каменного материала, представляющая собой сплошной шлейф осыпей, по которой каменный материал поступает во вторую – нижнюю часть каменного глетчера. 2/3 ширины этого шлейфа «питает» основную часть каменного глетчера, а 1/3 ширины шлейфа (в левой части транзитной зоны) дает материал, который формирует отдельный поток, отделенный от основного глубокой ложбиной.

Нижняя часть (II) каменного глетчера состоит из 3-х потоков: два смежных потока (правый (3) и центральный (2)) морфологически очень близки друг к другу, они доминируют по своим размерам и масштабам растекания, эти потоки имеют общую часть питания в транзитной

зоне, и с отметки 2090 м они начинают обособляться, меняя направление течения потоков (вверх и вниз по долине р. Маашей), имеют ярко выраженный рельеф поверхности в виде чередующихся валов и ложбин разных размеров; *третий поток* (левый (1)) отделен как от склона долины, так и от других потоков глубокой ложбиной (глубиной 10-25 м), направление течения – вниз по долине р. Маашей, имеет выпуклую структуру вдоль всего потока, не имеет выраженных поперечных валов, что предположительно указывает на иную скорость течения материала, отличную от соседних потоков; фронтальная его часть выходит на поверхности ранних генераций Маашейского каменного глетчера и не имеет четкой выраженности в плане.

Правый и центральный потоки состоят из двух генераций (активной и неактивной). Неактивность нижних генераций (2Б и 3Б) подтверждается тем, что их передние и боковые фронты практически на всём протяжении стабилизированы и задернованы, поверхность валов сглажена и их верхние части в значительной степени покрыты растительностью, в том числе древесной. Нужно отметить, что часть бокового фронта генерации 3Б, обращенная к верхней части долины, слабозадернована и сохранила угол естественного откоса за счет эрозионного воздействия временных водотоков.

По периметру фронтов криогенного потока встречаются:

а) фрагменты более ранних генераций Маашейского каменного глетчера (В). Они отличаются от «современных» относительной стабильностью валов, характером и распространением растительного покрова;

б) окраинные части фронта потоков ранних генераций, затапливаемые озерными и речными водами (Во). Располагаются они в местах, где примыкало Маашейское озеро. Поверхности этих каменных образований покрыты песчаными и глинистыми частицами, ими также заняты межкаменные пространства. На этих участках в некоторых местах имеются следы озерных уровней;

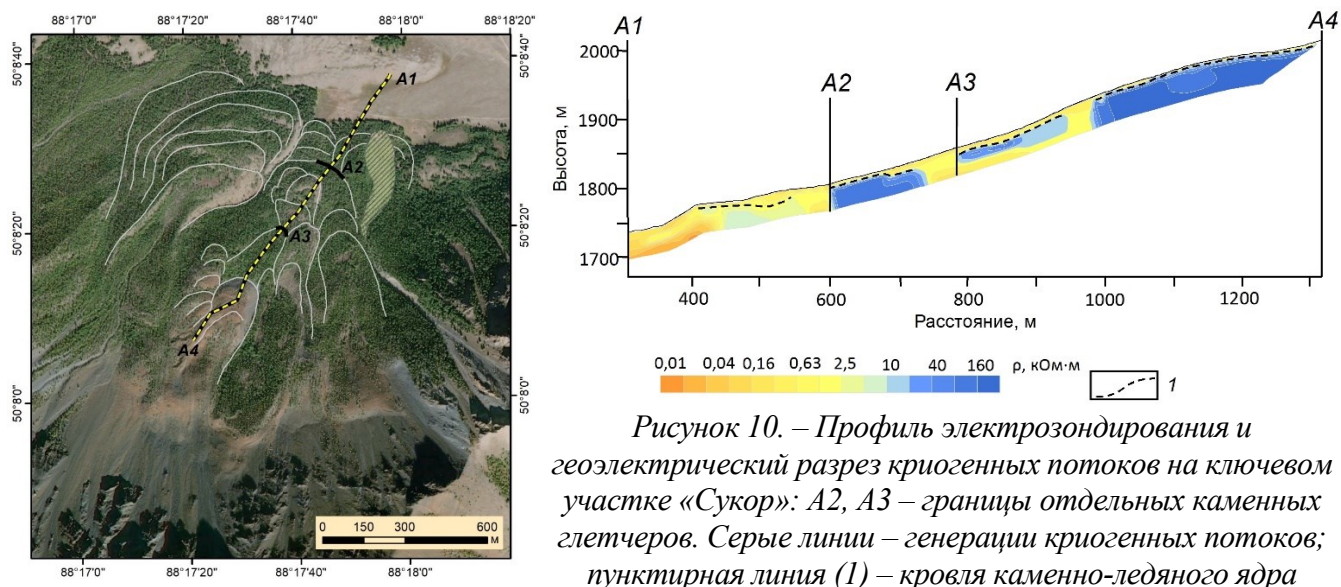
в) окраинные части фронта потоков ранних генераций, сформированные в результате катастрофического схода оз. Маашей (Вн). Река в настоящее время довольно активно подмывает данные участки. Эти части фронта представлены крутыми склонами, с постоянно осыпающимися материалом.

– Долина р. Чуя – участок «Сукорский»

Расположен на крайних северо-восточных отрогах Северо-Чуйского хребта, и приурочен к северному макросклону массива г. Сукор. На данном участке несколько каменных глетчеров сформировались из материала неоплейстоценового оползне-обвала. Расположенные в высотном интервале 1720–2100 м н.у.м., т.е. преимущественно в среднегорье, четыре образования являются неактивными, но сохраняющими в себе ледяное ядро, а одно – имеет активную современную генерацию. На данном участке были выполнены геофизические исследования внутреннего строения трех криогенных потоков (рис. 10): двух неактивных (первый – начинается с середины профиля А1-А2, и заканчивается на границе А2; второй – от границы А2 до границы А3) и одного активного (от границы А3 и до конца профиля).

Рельеф поверхности нижнего каменного глетчера выражен очень слабо; он полностью покрыт древесной растительностью, а центральная его часть нарушена селевым потоком. Поверхностный рельеф криогенного потока, пересекаемого на участке А2–А3 выражен слабо, но на нем выделяется несколько генераций, осложнённых поперечными валами; его поверхность также преимущественно покрыта древесной растительностью. Верхний каменный глетчер также состоит из нескольких генераций, верхняя из которых активная и имеет хорошо выраженный рельеф поверхности, состоящий из поперечных валов и двух продольных ложбин, разделяющих отдельные потоки каменного глетчера.

На данном ключевом участке каменно-ледяные ядра каменных глетчеров залегают с глубины 2,5-5 м на активной генерации, и глубже 5 м – на неактивных. Активный каменный глетчер отличается от неактивных, более высокими значениями удельного электрического сопротивления (далее – УЭС) а значит и более высокой льдистостью. Удельное электрическое сопротивление пород каменно-ледяного ядра активной генерации криогенного потока в среднегорье изменяется от 10-15 кОм·м до 160 кОм·м в центре ядра.



– Долина р. Елангаиш

Ключевой участок расположен на склоне северо-западной экспозиции Южно-Чуйского хребта, на правом берегу р. Елангаиш, выше устья р. Турой (рис. 11). Каменные глетчеры на данном участке располагаются на высотах 2585-2677 м н.у.м., т.е. в высокогорье.

На этом участке долины пять каменных глетчеров языкообразной формы; их боковые фронты тесно соприкасаются. Длина отдельных образований колеблется от 270 до 550 м, ширина – от 150 до 370 м. Исследования внутреннего строения проводились на двух образованиях: нижнем (крайнем северо-восточном) и верхнем (крайнем юго-западном).

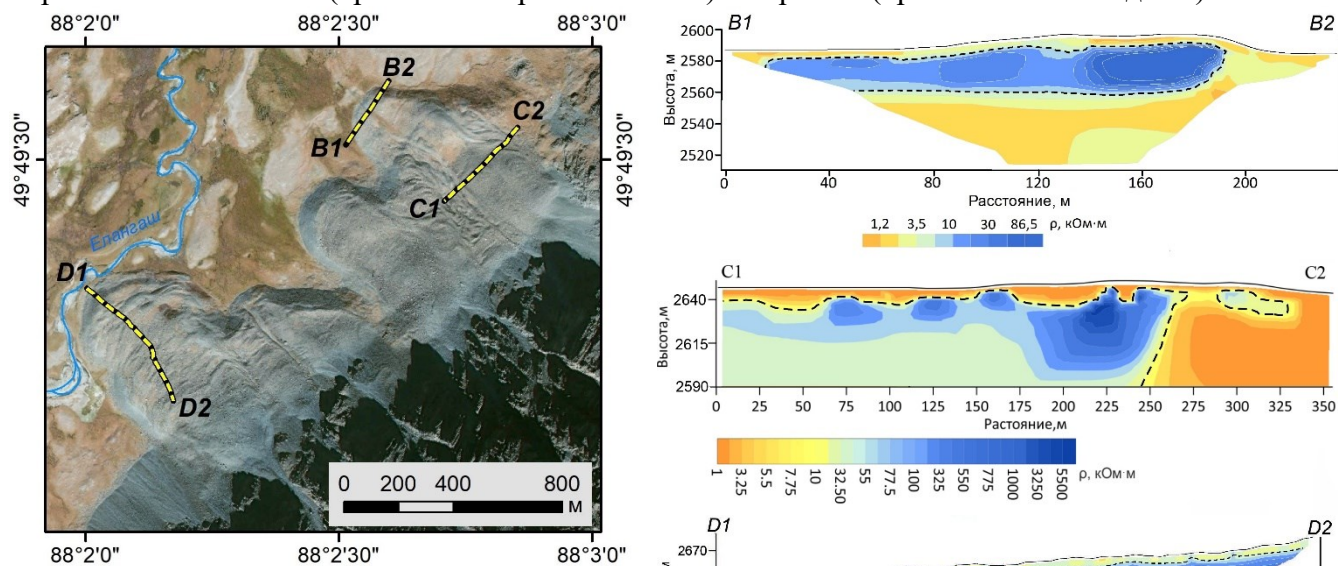


Рисунок 11. – Профили электрозондирования и геоэлектрические разрез криогенных потоков на ключевом участке «Елангаиш». Пунктирной линией (1) показана граница каменно-ледяного ядра

Нижний каменный глетчер состоит из трёх генераций, верхняя из которых – активная. Поверхностный рельеф этого образования выражен слабо; его неактивные генерации частично перекрыты соседним криогенным потоком. Общая длина каменного глетчера не превышает 510 м; длина активной генерации – 253 м. Верхний – это активный каменный глетчер, состоящий из одной генерации; уклон поверхности – 15°. Длина данного потока – около 550 м. Поверхность каменного глетчера осложнена многочисленными валами, расположенными перпендикулярно направлению движения потока. По периметру всего фронта криогенного

потока имеются многочисленные ключи. Поток спускается к руслу р. Елангаш, подпирая и смещая его к противоположному склону долины на 150 м.

Исследование внутреннего строения было проведено на двух поперечных профилях нижнего криогенного потока (профиль *B1-B2* пересекает неактивную генерацию каменного глетчера, а профиль *C1-C2* – его верхнюю, активную, генерацию), а также на осевом профиле верхнего криогенного потока (*D1-D2*).

Анализ данных электротомографии показывает, что на данном ключевом участке каменно-ледяные ядра каменных глетчеров залегают с глубины 2-3 м на активных генерациях, и с 5 м на неактивных. Удельное электрическое сопротивление пород каменно-ледяного ядра активных генераций криогенных потоков изменяется от 20-40 кОм·м до 1100-3000 кОм·м в центре ядра; неактивных – от 10-15 кОм·м на периферии и до 100 кОм·м в центре.

– Долина р. Джело

Ключевой участок расположен в среднем течении р. Джело (Северо-Чуйский хребет), на левом берегу троговой долины. Долина в данном месте изгибается, поворачивая с востока-юго-востока на юго-юго-запад. На данном участке долины имеется только один каменный глетчер. Гипсометрически он располагается ниже криогенных потоков в долине р. Елангаш на 200 м. Образование активное, состоит из одной генерации, по типу относится к криогенным потокам. Форма в плане – языкообразная; морфология поверхности характеризуется хорошо выраженными поперечными и продольными валами и ложбинами (рис. 12).

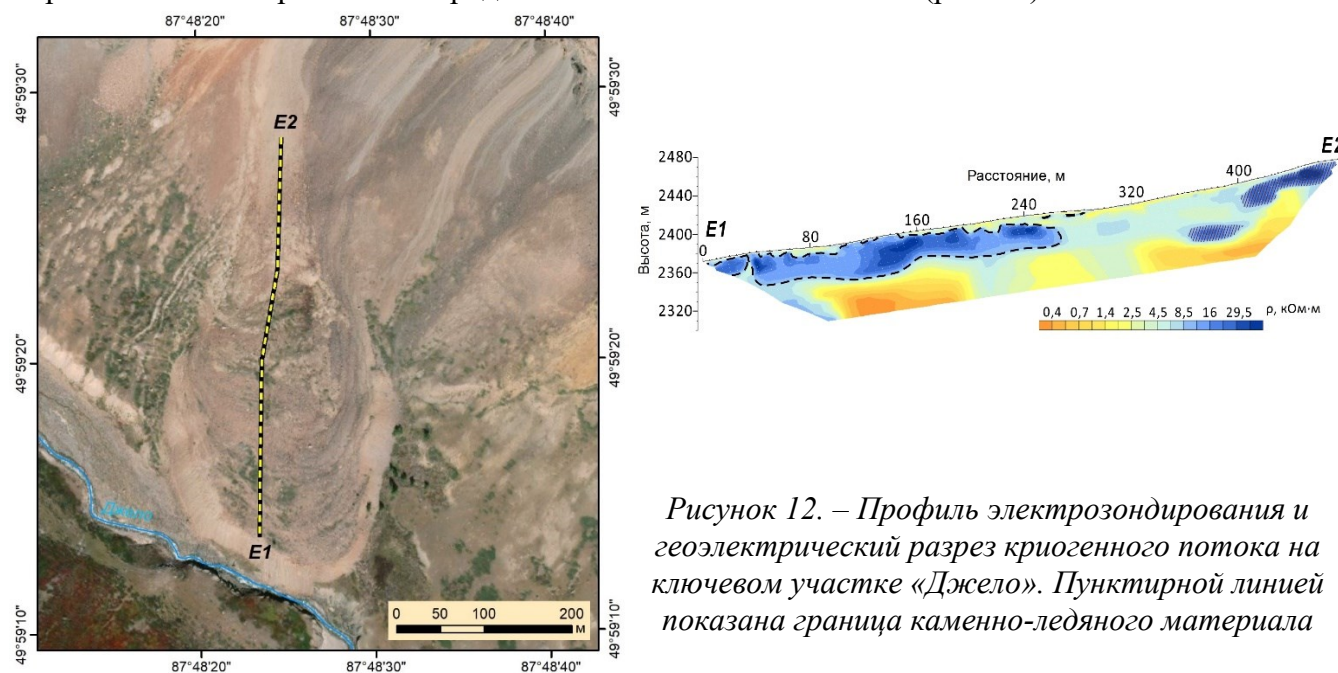


Рисунок 12. – Профиль электротомографии и геоэлектрический разрез криогенного потока на ключевом участке «Джело». Пунктирной линией показана граница каменно-ледяного материала

Каменный глетчер на данном участке располагается на высотах 2358-2442 м н.у.м., т.е. в высокогорной области. Общий уклон поверхности каменного глетчера – 13°; общая длина – 430 м. Его поверхность осложнена многочисленными подковообразными валами, повторяющими по форме линию фронта, а также тремя продольными ложбинами. В прифронтальной области имеются водотоки (ключи).

Кровля каменно-ледяного ядра каменного глетчера залегает здесь на глубине от 2 до 3,5 м (рис. 12). Содержание льда в теле данного каменного глетчера выше, чем в образованиях, расположенных в среднегорной области, но существенно ниже, чем у каменных глетчеров в долине р. Елангаш. Помимо более низкой высоты расположения объекта и его южной экспозиции, это объясняется особенностью слагающих его пород: он преимущественно сформирован рассланцованными алевролитами и песчаником, которые образуют сравнительно мелкие дресвяно-щебнистые обломки, которые, при попадании в тело каменного глетчера, оставляют мало пространства для формирования ледяного материала, в отличие от крупноглыбовых отложений, формирующихся из алевролитов и аргиллитов, слагающих каменные глетчеры в долине р. Елангаш.

– Долина р. Верхний Тураюк – участок «Аккол»

Долина р. Верхний Тураюк – троговая, ориентирована с запада на восток, небольшая по размеру, имеет протяженность 7,5 км и ширину 2,5-3,5 км (по водоразделам); дно долины располагается на отметке 2580 м н.у.м. и приподнято на 280-300 м над дном основной долины р. Аккол (т.е. долина является висячей).

На данном участке проводилось исследование гляциогенного потока. Он располагается на левом берегу р. Верхний Тураюк, в нижней части долины, на северном её склоне, берет начало в устье кара из конечного моренного комплекса ледника №79 на отметке 2770 м н.у.м. и опускается до отметки 2610 м н.у.м. Гляциогенный поток выходит в долину р. Верхний Тураюк широким фронтом, растекаясь веером, но с общим уклоном вниз по долине, сминая перед своим фронтом в складку высотой 5–10 м отложения противоположенного склона и погребая под собой реку (рис. 13).

Гляциогенный поток – активный, имеет длину порядка 570 м, общий уклон поверхности 10°. Поверхность гляциогенного потока ребристая, с многочисленными валами и ложбинами, незадернованная, каменный материал разного размера (от нескольких сантиметров до 10–15 м) подвижный; межкаменное пространство не занято мелкоземом.

Измерения проводились по профилю, заложенному вдоль одной из осей движения гляциогенного потока, в нижней части его языка (рис. 13).

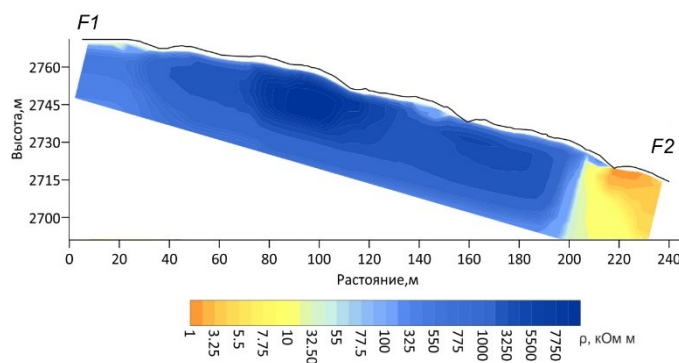
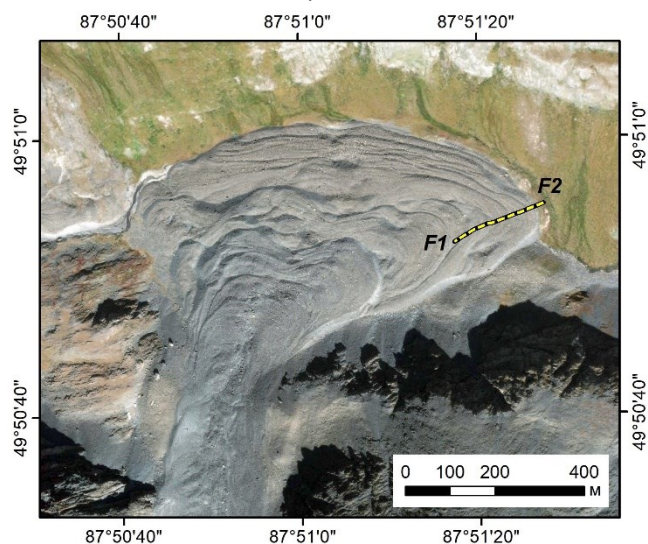


Рисунок 13. – Профиль электрозондирования и геоэлектрический разрез гляциогенного потока на ключевом участке «Аккол»

На полученном геоэлектрическом разрезе можно видеть, что высокоомный слой с УЭС более 20 кОм·м, который интерпретируется как каменно-ледяное ядро гляциогенного потока, занимает практически весь профиль. Наличие в центральной части разреза участков с аномально большими значениями УЭС (более 3000 кОм·м) свидетельствует в пользу того, что основу каменно-ледяного ядра данного каменного глетчера могут составлять линзы чистого льда, унаследованного от ледника. Подошву каменно-ледяного ядра каменного глетчера, ввиду экранирующего эффекта от слоя-изолятора, на данном объекте выделить не удалось.

По результатам анализа геофизических исследований построена сводная таблица, позволяющая сопоставить характеристики расположения и внутреннего строения каменных глетчеров разных типов на разных высотах (см. табл.).

Отличительные особенности изученных криогенных потоков – разные удельное электрическое сопротивление (УЭС) их внутренних частей, степень консолидации и глубина залегания в них льда. Ядро криогенного потока, расположенного на высоте 2642–2649 м н.у.м., характеризуется значительно большим УЭС (20–3000 кОм·м) по сравнению с УЭС каменно-ледяного ядра каменного глетчера на высоте 1723–1790 м н.у.м. (10–40 кОм·м). УЭС каменно-ледяных ядер каменных глетчеров на разных высотах определяется в первую очередь сопротивлением льда, которое сильно зависит от температуры, в то время как удельное электрическое сопротивление каменного материала от температуры, и, следовательно, от высоты, зависит слабо. Таким образом, степень консолидации и общий объём льда

в каменно-ледяных ядрах является ключевым фактором, влияющим на УЭС каменных глетчеров. Аномально большое УЭС каменно-ледяных ядер каменных глетчеров в долинах р. Елангаш (склон северо-западной экспозиции, абс. высота 2585–2677 м) и Джело (склон южной экспозиции, абс. высота 2358–2442 м) связано с их относительно низкой отрицательной температурой и преобладанием в них льда над каменным материалом. Используя известную зависимость удельного электрического сопротивления ледникового льда от температуры (Фролов, 1998), можно выполнить приблизительную оценку температуры исследуемых каменных глетчеров. Для каменно-ледяных ядер с удельным электрическим сопротивлением около 1000–2000 кОм·м характерна температура порядка $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, для каменно-ледяных ядер с сопротивлением 10-40 кОм·м температура составляет $-0,5\dots-1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Глубина залегания льда в теле каменного глетчера в первую очередь зависит от температуры (которая в свою очередь зависит от высоты местности), а во вторую – от экспозиции склона, на котором расположен каменный глетчер. На склонах южной экспозиции глубина залегания каменно-ледяных ядер на 0,5-1,5 м ниже, чем на северных склонах.

Таблица. Характеристика каменных глетчеров по данным электротомографии

Участок	«Сукорский»			«Елангаш»			«Джело»	«Аккол»
Тип каменного глетчера	Криогенные потоки			Криогенные потоки			Криогенный поток	Гляциогенный поток
Динамическая активность	Неактивные		Акт.	Неакт.	Активные		Активный	Активный
Профиль	A_1-A_2	A_2-A_3	A_3-A_4	B_1-B_2	C_1-C_2	D_1-D_2	E_1-E_2	F_1-F_2
Характеристика								
Высотное положение профиля, м	1723-1790	1766-1838	1824-2005	2585-2597	2642-2649	2631-2677	2358-2442	2715-2770
Экспозиция склона	СВ	СВ	СВ	СЗ	СЗ	З	Ю	С
Глубина залегания кровли каменно-ледяного материала, м	5-15	5-10	2,5-5	5-10	3-6	2-4	2-3,5	1,5-2
Мощность каменно-ледяного ядра, м	>15	15	10-15	30*	>10	>18	12-15	>15
УЭС активного слоя, кОм·м	0,1-2	1-2	2	1,2-3	1-2	1-5	2-3	-
УЭС каменно-ледяного ядра, кОм·м	10-40	10-40	20-160	10-100	20-3000	40-1100	15-45	20-3000, и >

Примечание: * Вероятнее всего – это суммарная мощность каменно-ледяного ядра каменного глетчера и нижележащих многолетнемерзлых отложений.

Сравнение внутреннего строения криогенных потоков и гляциогенного потока показывает, что УЭС каменно-ледяного ядра последнего существенно выше, что объясняется тем, что в центральной части оно может представлять собой линзу чистого льда, унаследованного от ледника, и по периферии «обросшего» каменно-ледяным материалом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований были сформулированы следующие выводы:

1. К настоящему времени накоплен существенный объём знаний о каменных глетчерах по всему миру, и он регулярно пополняется. Тем не менее, существуют слабо проработанные вопросы, в частности: внутреннее строение данных образований, связь их генезиса с морфологией и внутренним строением, сопряженность данных форм рельефа с природными условиями их формирования в отдельных регионах, которые и были рассмотрены в данной работе.

2. Одним из вопросов, вызывающих споры между гляциологами и геокриологами остаётся терминология, используемая для обозначения исследуемых образований. На основе классификаций каменных глетчеров различных авторов, а также собственных исследований разработана система терминов, дополнена и уточнена морфогенетическая классификация каменных глетчеров для территории Алтая. Основываясь на генезисе ледяного ядра и

источнике каменного материала предложено выделять два основных типа каменных глетчеров: гляциогенный поток и криогенный поток, и один промежуточный тип – каменный глетчер смешанного генезиса. Предложено ввести дополнительный элемент классификации – единовременность формирования, который позволяет судить о генезисе и этапах формирования и развития каменных глетчеров.

3. Ведущими факторами, влияющими на распространение каменных глетчеров на территории Центрального Алтая, являются гипсометрический, орографический и климатический. При продвижении с запада на восток Центрального Алтая происходит повышение средней высоты расположения днищ долин, а также аридизация и усиление континентальности климата. Это способствуют тому, что средняя высота формирования гляциогенных и криогенных потоков возрастает с запада на восток: у криогенных потоков – с 2250 м до 2730 м; у гляциогенных потоков – с 2310 м до 2890 м. Также было установлено, что экспозиционная приуроченность склонов оказывает влияние на внутреннее строение (на глубину залегания каменно-ледяного ядра) и на среднюю высоту распространения объектов (на склонах южной экспозиции она выше, чем на северных склонах).

4. Разработана методика выделения границ, и проведено картографирование каменных глетчеров на основе данных ДЗЗ и полевых исследований. Основными дешифровочными признаками служат следующие морфологические особенности каменных глетчеров: в плане подковообразная выпуклая натечная формы, фронтальный уступ заканчивающиеся осыпным шлейфом, напорные и ударные валы у его основания, натечные ступени, придающий характерный ложбинно-рядовой рельеф, наличие во фронтальной их части ручьев и ключей. Основными дешифровочными признаками при выделении верхних границ криогенных потоков служат изменение уклона поверхности, характер лишайникового покрова (влияющий на цвет отложений), гранулометрический состав обломков.

5. На территории Центрального Алтая было выделено 3180 объектов общей площадью 312,5 км²; большая их часть (88%) относится к криогенным потокам, т.е. не имеет генетической связи с современным оледенением. Пять каменных глетчеров на территории Центрального Алтая имеют площадь, превышающую 1 км²: это гляциогенный поток на южном макросклоне Катунского хребта, криогенный поток на его северном макросклоне (это также самый длинный каменный глетчер Центрального Алтая – 5,6 км), каменный глетчер смешанного генезиса на северном макросклоне Катунского хребта, а также криогенный поток и каменный глетчер смешанного генезиса, расположенные на Южно-Чуйском хребте. Средняя же площадь каменных глетчеров составляет 0,1 км².

Суммарная площадь выявленных каменных глетчеров в настоящее время всего в 2 раза меньше суммарной площади оледенения Алтая, что говорит об их существенном воздействии на перигляциальные геосистемы, которое со временем, при сохранении современных темпов деградации ледников, будет только возрастать.

Более 50% каменных глетчеров образовалось у подножия склонов, т.к. здесь скапливается и сюда регулярно поступает наибольшее количество обломочного материала.

Всего 1,5% каменных глетчеров Центрального Алтая расположены на территориях, не затронутых позднеплейстоценовым и голоценовым оледенением. Часть из них сформировались из материала неоплейстоценового оползне-обвала, часть приурочена к древнеледниковым карам, сформированным более ранними стадиями оледенения.

Активные каменные глетчеры на территории Центрального Алтая встречаются в высотном диапазоне от 1278 до 3185 м н.у.м.; но большая их часть (более 90%) приурочена к высотам 2200–3000 м н.у.м.

6. С увеличением высотного положения криогенных потоков отмечается возрастание УЭС каменно-ледяного материала, что, при сопоставимом объеме каменно-ледяных ядер каменных глетчеров в среднегорной и высокогорной области, говорит о том, что высокогорные образования имеют более высокую степень консолидации ледяного материала, а значит более высокую льдистость; это непосредственно связано с уменьшением среднегодовых температур. Более высокие значения УЭС у гляциогенных потоков (по сравнению с криогенными потоками)

свидетельствует в пользу того, что основу каменно-ледяных ядер данных каменных глетчеров составляют линзы чистого льда, унаследованные от ледников.

Экспозиционная приуроченность объектов практически не влияет на значения УЭС, но отражается на глубине залегания каменно-ледяных ядер каменных глетчеров.

Наличие хорошо выраженных положительных форм рельефа на поверхности каменных глетчеров чаще всего предполагает наличие в его структуре нескольких ядер консолидации ледокаменного материала; положительные морфоскульптуры чаще всего совпадают с их расположением в теле каменного глетчера, хотя иногда наблюдается инверсия.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Рецензируемые научные издания, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций

Дьякова Г.С., Горевячева А.А., Шеин А.Н., Потапов В.В., Бурым Р.Д., Останин О.В., Оленченко В.В. Геоэлектрические модели гляциально-мерзлотных каменных образований Центрального Алтая // Лёд и снег. 2023. Т.63. №4. С. 583-596.

Дьякова Г.С., Горевячева А.А., Останин О.В., Оленченко В.В., Бирюков Р.Ю. Геофизические исследования внутреннего строения гляциально-мерзлотных каменных образований Центрального Алтая // Лёд и снег. 2020. Т.60. №1. С. 109-120.

Дьякова Г.С., Оленченко В.В., Останин О.В. Применение метода электротомографии для изучения внутреннего строения каменных глетчеров Алтая // Лед и снег. 2017. Т.57. №1. С. 69-76.

Останин О.В., Дьякова Г.С. Гляциально-мерзлотные каменные образования Центрального Алтая // Известия АГУ. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2013. №3-2 (79). С. 167-170.

Dyakova G.S., Goreyavcheva A.A., Potapov V.V., Shein A.N., Lobachev D.S., Ostanin O.V., Olenchenko V.V., Bobkova D.G. Internal structure of rock glaciers in Altai (The case of talus rock glacier in Dzhelo River Valley) // Ukrainian Journal of Ecology. 2019, 9 (4). P. 729-731. DOI: 10.15421/2019_818.

Публикации в других изданиях

Дьякова Г.С., Останин О.В. Гляциально-мерзлотные каменные образования бассейна р. Чуи (Горный Алтай). Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2014. 152 с.

Останин О.В., Дьякова Г.С. Гляциально-мерзлотные каменные образования верхней части бассейна р. Катунь. Свидетельство о гос. регистрации № 2013621426 от 14.11.13 г.

Дьякова Г.С., Останин О.В. Гляциально-мерзлотные каменные образования бассейнов рек Юстыт и Бар-Бургазы. Свидетельство о гос. регистрации № 2014620233 от 06.02.14 г.

Дьякова Г.С., Останин О.В. Каменные глетчеры бассейна р. Чаган-Узун. Свидетельство о гос. регистрации № 2015621725 от 02.12.15 г.

Патрушева А.Д., Дьякова Г.С. Гляциально-мерзлотные каменные образования бассейна р. Чулышман. Свидетельство о гос. регистрации № 2023624600 от 13.12.2023 г.

Останин О.В., Дьякова Г.С. Морфодинамическая классификация каменных глетчеров Алтая // География и природопользование Сибири. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2013. Вып.16. С. 114-124.

Дьякова Г.С., Останин О.В. Каталогизация гляциально-мерзлотных каменных образований верхней части бассейна Чуи // Труды молодых ученых Алтайского государственного университета. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2014. №11. С. 133-136.

Дьякова Г.С., Останин О.В. Гляциально-мерзлотные каменные образования бассейна р. Чуи // Ломоносовские чтения на Алтае: фундаментальные проблемы науки и образования. Сборник научных статей международной конференции. Барнаул, 2014. С. 958-963.

Мельничук Л.В., Дьякова Г.С., Останин О.В. Каменные глетчеры Алтая: проблемы изучения морфологии, динамики и особенностей развития // Ломоносовские чтения на Алтае: фундаментальные проблемы науки и образования. Сборник научных статей международной

конференции. Барнаул, 2014. С. 980-984.

Дьякова Г.С., Останин О.В. Гляциально-мерзлотные каменные образования Алтая: Южно-Чуйский хребет // География и природопользование Сибири. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2015. Вып.19. С. 56-62.

Мельничук Л.В., **Дьякова Г.С.,** Останин О.В. Каменные глетчеры бассейна р. Ак-Алаха (Республика Алтай) // Материалы Пятой конференции геокриологов России. Часть 5. Региональная и историческая геокриология. Часть 6. Динамическая геокриология. Геокриологические процессы и явления. Москва: МГУ им. Ломоносова, 2016. С. 83-87.

Дьякова Г.С., Останин О.В. География распространения и морфологические особенности гляциально-мерзлотных каменных образований Центрального Алтая // Природные условия, история и культура Западной Монголии и сопредельных регионов: сборник материалов XIII Международной научной конференции. 20–22 сентября 2017 г., Барнаул / отв. ред. А.Г. Редькин, И.Н. Ротанова. Барнаул-Ховд: Изд-во АлтГУ, 2018. С. 103-105.

Дьякова Г.С., Останин О.В., Гореевцева А.А., Оленченко В.В. Исследование строения гляциально-мерзлотного каменного образования в долине р. Джело (Центральный Алтай) // География и природопользование Сибири. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2019. Вып. 26. С. 64-70.

Дьякова Г.С., Лобачев Д.С., Ковалев М.В., Гореевцева А.А. Каменные ледники Алтая // Современные исследования в науках о Земле: ретроспектива, актуальные тренды и перспективы внедрения: материалы Международной научно-практической конференции. Астрахань: Изд-во ФГБОУ ВПО «Астраханский государственный университет», 2019. С. 179-181.

Дьякова Г.С., Патрушева А.Д., Останин О.В. Гляциально-мерзлотные каменные образования Алтая // Мониторинг в криолитозоне: Сборник докладов Шестой конференции геокриологов России с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов. Под редакцией Р.Г. Мотенко. Москва, 2022. С. 165-168.