

УДК 551.435.1 (571.651)

СТРУКТУРА СКЛОНОВОЙ ЛОЖБИННОЙ СЕТИ КРИОЛИТОЗОНЫ В ОКРЕСТНОСТЯХ г. АНАДЫРЯ

© 2021 г. А. М. Тарбеева^{1,*}, О. Д. Трегубов², Л. С. Лебедева³

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия

²Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило ДВО РАН, Магадан, Россия

³Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия

*E-mail: amtarbeeva@yandex.ru

Поступила в редакцию 06.12.2019 г.

После доработки 28.03.2020 г.

Принята к публикации 06.10.2020 г.

Сток воды на склонах в криолитозоне проходит по сети ложбин разного строения и рисунка в плане, хорошо различимых на аэрофото- и космоснимках, но часто плохо выделяемых на местности. Исследование направлено на выявление причин различия структуры ложбинной сети, которое необходимо для понимания механизмов формирования поверхностного стока и динамики рельефа криолитозоны. В окрестностях г. Анадыря выделены три морфологических типа ложбинной сети, на участках распространения которых проведены полевые наблюдения, а по цифровой модели местности и снимкам получены морфометрические характеристики склонов, к которым они приурочены. Для каждого типа характерен свой диапазон абсолютных высот, тип рельефа, форма склона, состав отложений, распределение глубины сезонного протаивания. Установлено, что, хотя все типы ложбин используются для стока поверхностных вод, в их формировании преобладают различные процессы. Ложбины с веерной структурой образуют наиболее густую параллельную сеть с расстоянием 10–40 м друг от друга. Они характерны для вогнутых склонов междуречий крутизной 2–5° с близким залеганием коренных пород и являются результатом флювиальной моделировки неровностей, образующихся в результате неравномерного сползания склонового чехла. Переплетающиеся ложбины приурочены к склонам вулканических сопков, наиболее крутым среди рассмотренных склоновых поверхностей разного рода. В их днищах наблюдаются свежие отложения илистых наносов, и в их образовании существенную роль играют эрозионно-делювиальные процессы. Одиночные ложбины, расположенные на значительном (200–300 м) удалении друг от друга, формируются в рыхлых четвертичных отложениях с развитой сетью полигонально-жильных льдов, и в их углублении велика роль термокарста. От структуры ложбинной сети, морфологии, геологического и мерзлотного строения ложбин зависят процессы формирования поверхностного стока на водосборе, в том числе отклик водотоков на метеорологические события, а также возможная реакция рельефа на климатические изменения.

Ключевые слова: делли, ложбины стока, многолетняя мерзлота, криогенные склоновые процессы, верхние звенья гидрографической сети, сезонно-талый слой

DOI: 10.31857/S0435428121010132

ВВЕДЕНИЕ

С распространением космических и аэрофото- снимков высокого пространственного разрешения расширились возможности изучения структуры мезо- и микрорельефа, особенно на открытых незалесенных пространствах. Благодаря чему было установлено, что поверхностный сток на склонах концентрируется по сети ложбин, которые формируют специфическую структуру склоновой дренажной сети. В криолитозоне чаще всего эта ложбинная сеть имеет субпараллельный полосчатый рисунок за счет большего увлажнения пониженных участков, направленных строго вниз по склону [1, 2]. Длина склоновых ложбин

достигает первых километров, ширина от одного–двух до первых десятков метров, глубина обычно не превышает полуметра. На местности ложбинная сеть чаще всего выражена очень слабо, она плохо отображается на наземных фотографиях, и ее изучение только наземными методами крайне затруднительно. В литературе отмечается важная роль ложбинной сети в формировании стока малых рек криолитозоны. Во время снеготаяния ложбины, находящиеся в мерзлом состоянии, способствуют быстрому стоку поверхностной воды по склонам, но летом, за счет увеличенной под ними глубины сезонного протаивания, накапливают воду в подстилающих отложениях [2, 3]. В свою очередь, от возможностей задержа-

ния и накопления воды зависит термический режим подстилающих пород, а значит и возможная реакция рельефа на изменения климата, в частности, развитие по ложбинам эрозионных и термокарстовых процессов. Между тем, сведения о закономерностях строения ложбинной сети, ее характеристики, факторах и механизмах ее формирования очень скудны. В этой связи, сопоставление материалов дешифрирования склоновой дренажной сети с результатами наблюдений на местности представляются весьма актуальными. Окрестности г. Анадыря относительно хорошо доступны, отличаются разнообразием рельефа и широким распространением склоновых ложбин, поэтому благоприятны для проведения такой работы. Целью исследования было выявление факторов, влияющих на структуру склоновой ложбинной сети, их морфологических и геокриологических различий в окрестностях Анадыря.

ИЗУЧЕННОСТЬ ПРОБЛЕМЫ, ТЕРМИНЫ И ПОНЯТИЯ

Русское слово “ложбина” широко и давно используется в качестве термина в естественных науках и имеет множество значений [4]. Наиболее распространенные определения, используемые в геоморфологии, детально рассмотрены в монографии Е.А. Еременко и А.В. Панина [5]. В упомянутой работе рассмотрена ложбинная сеть флювиального происхождения за пределами современной криолитозоны, хотя отмечается, что часть описанных ложбин являются реликтами холодных эпох. Мы же остановимся на ложбинной сети современной криолитозоны, что, вероятно, поможет глубже понять механизмы формирования, в том числе реликтовой ложбинной сети. Вслед за Е.А. Еременко и А.В. Паниным [5], в нашем исследовании под ложбинами будем подразумевать линейные отрицательные формы рельефа ранга мезоформ (длиной от первых сотен метров до первых километров) с корытообразным поперечным профилем и нечеткими структурными линиями – бровками и тыловыми швами днища.

Первые исследования пологих ложбин, образующих в криолитозоне характерный полосчатый рисунок на склонах – деллей (dells), выполнены геоморфологами и были направлены на поиск причин образования этих форм рельефа. К.Л. Митт [1] связывал образование деллей северо-западной Якутии с деятельностью временных водотоков, так как находил в их днищах эрозионные борозды, заполненные илом и песком с мелким щебнем, но указывал на существенную роль криогенных процессов в подготовке материала к выносу. Е.Г. Катассова [6] придавала решающее значение термокарсту, так как в днищах описанных ей деллей отсутствовал высокольдистый горизонт, наблюдавшийся на прилегающих частях склона.

С.С. Воскресенский [7], изучая строение склоновых отложений, связывал образование деллей с неравномерным смещением склонового чехла, в первую очередь, под действием медленной солифлюкции. К. Холл [8] на основе наблюдений в Канаде предложил гипотезу о решающей роли крупных млекопитающих (овцебыков, мамонтов и других) в активизации термоэрозионных процессов по жильным льдам, которая приводит к образованию деллей.

На Аляске была проведена серия исследований, направленных на выявление роли склоновых ложбин в формировании речного стока. Здесь склоновые ложбины чаще описаны под термином “water tracks” [2, 3, 9, 10]. Сравнивая структуру речной сети и склоновых ложбин, Дж.П. Макнамара [9] пришел к выводу о том, что ложбины не подчиняются фрактальным закономерностям подобия, характерным для древовидной русловой сети и являются эрозионной сетью, развитие которой ограничено близким залеганием мерзлого водоупора. Отмечается, что в условиях деградации мерзлоты при потеплении климата может произойти углубление ложбин и развитие овражной сети.

На Аляске был проведен статистический анализ характеристик ложбин: морфометрических, растительного покрова и литологии, на основе которого выделены и верифицированы 5 классов ложбин: 1 – “mineral-flark”, 2 – “narrow”, 3 – “steep”, 4 – “organic-rich”, 5 – “wide” [10] (далее по тексту их содержание раскрывается). Авторами отмечается, что, с целью достижения объективности, проведенная классификация была именно статистической и умышленно не имела изначальной ландшафтной интерпретации. Было установлено, что решающими в различиях ложбин являются литологические и геоморфологические факторы. Первые три класса ложбин оказались приурочены к склоновым отложениям, четвертый класс – к отложениям с большой мощностью торфа (более 0.5 м) и полигонально-жильными льдами, а пятый – к аллювиальным и флювиогляциальным отложениям. Из трех классов, приуроченных к склоновым отложениям, первый (“mineral-flark”) отличается наличием грядово-мочажинного микрорельефа, прослоями глины и гравия. Ложбины второго класса (“narrow”) узкие, сильно увлажнены, но грядово-мочажинный нанорельеф в них отсутствует. Ложбины третьего класса формируются на наиболее крутых на рассматриваемом участке [10] склонах (до 8°) и отличаются по характеру растительного покрова. Выделенные классы имеют значительные перекрытия в характеристиках и могут сменять друг друга по протяжению ложбины сверху вниз. В этой классификации взаиморасположение и плановый рисунок ложбин не учитывались, хотя по приведенным рисункам видно, что второй класс

(“narrow”) характеризуется четко выраженной густой параллельной полосчатостью, тогда как ложбины первого и третьего класса ветвятся и сливаются между собой, в ложбинах третьего класса наблюдаются эрозионные врезы. Классификация ложбин Аляски показала разнообразие их физических свойств (мощности мха, растительности, уклонов, литологии), которые сказываются на особенностях стока воды. Однако выделенные подобным образом классы ложбин не показали географической разобщенности выделенных типов ложбин, что затрудняет понимание механизмов их образования и выявление закономерностей пространственного распространения. Наша работа направлена на выявление географических закономерностей, определяющих морфологию ложбин в криолитозоне.

ПРИРОДНЫЕ УСЛОВИЯ И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

За исключением упомянутых выше работ середины прошлого века, а также недавних работ авторов в северо-западной Якутии [11], криолитозона России не исследована в отношении распространения и гидрологических функций ложбинной сети. В июне–июле 2019 г. исследования склоновой ложбинной сети были проведены в 13–18 км к югу и юго-западу от г. Анадыря (Чукотка). Территория располагается в краевой части Анадырской низменности, в подзоне южной кустарниковой тундры, многолетняя мерзлота здесь сплошная, мощностью 100–150 м. Полевые наблюдения проводились в бассейне р. Угольная-Дионисия (ключевые участки “Базовый” и “Ягодный”), а также на небольших водосборах ручьев на склоне сопки Останцовой, непосредственно впадающих в Анадырский лиман (участок “Останцовая”) (рис. 1).

Рельеф территории представлен расчлененной пологоувалистой аккумулятивной равниной с преобладающими абсолютными отметками 40–100 м, над которой возвышаются небольшие сопки – Круглая, Останцовая, Михаила, Каменная – с высотами 160–200 м, максимальная отметка – 577 м (гора Дионисия), представляющие собой небольшие вулканические структуры (рис. 1). Территория сложена осадочными, вулканогенными и вулканогенно-осадочными образованиями мелового, палеогенового и неогенового возраста, перекрытыми четвертичными отложениями разной мощности, а иногда бронирующими вершинные поверхности междуречий на отметках 100–200 м [12]. На отметках до 40–50 м в юго-западной части территории развиты ледниковые и водно-ледниковые среднеплейстоценовые отложения, вдоль побережья в восточной части – морские верхнеплейстоценовые отложения. Скальные породы (базальты, андезит-базальты)

обнажаются в привершинных частях сопки, в обрывах и руслах глубоко врезанных долин рек, а также на абразионных морских берегах вблизи сопки. Междуречья заняты кочкарной или бугристой тундрой, местами обводненной.

Речная сеть хорошо развита. Руслу рек валунно-галечные, в истоках поймы не развиты, берега образованы склоновыми шлейфами. Склоны междуречий длинные (0.5–2 км) и очень пологие 2–5°, увеличивают крутизну к вершинам междуречий, где есть выходы коренных пород, заняты кочкарной тундрой. Крутые и средней крутизны склоны характерны лишь для сопки, абразионных уступов и подмываемых высоких бортов долин. Склоны крутизной менее 8–10° повсеместно расчленены сетью ложбин стока, имеющих разную густоту, строение и образующих разную структуру в плане. Ложбины имеют ширину от первых метров до первых десятков метров, глубину – первые десятки сантиметров, характеризуются отсутствием выраженного тальвега, преимущественно задернованы, более увлажнены по сравнению с прилегающими участками склонов. Ложбины стока являются основным морфологическим элементом склоновой дренажной сети, обеспечивая поступление склоновых вод в реки во время снеготаяния и обильных осадков. Отсутствуют ложбины на вершинах сопки, сложенных скальными или грубообломочными породами и на молодых морских отложениях (встречаются к югу от рассматриваемой территории).

Климат – субарктический морской, среднегодовая температура – 5°C. Положительные среднемесячные температуры наблюдаются с июня по сентябрь, за это время выпадает 126 мм осадков, остальные 260 мм выпадают в виде снега [13], который, благодаря ветрам, в тундре существенно перераспределяется по территории, заполняя глубокие врезы ручьев и оврагов и, вероятно, ложбины. Реки имеют преимущественно снеговое питание. Летом реки и ложбины питаются за счет таяния льдов деятельного слоя и дождевых вод. По данным наблюдений на склоне г. Дионисия [14], протаивание грунта начинается в первой половине июня, и до начала июля его скорости максимальны и составляют 1 см в сутки, затем постепенно снижаются. Интенсивность дождей сильно варьирует: в отдельные годы максимальное суточное количество осадков в июле и августе достигало 40–46 мм [13]. По мере протаивания грунта значительная часть осадков фильтруется, переходя в надмерзлотный сток. Необходимое для формирования поверхностного стока количество осадков зависит от глубины протаивания, состава отложений и степени предшествующего насыщения грунта водой. За время полевых наблюдений в конце июня выпавшие за 12 часов 2 мм осадков не привели к формированию поверхностного стока в исследованных ложбинах.

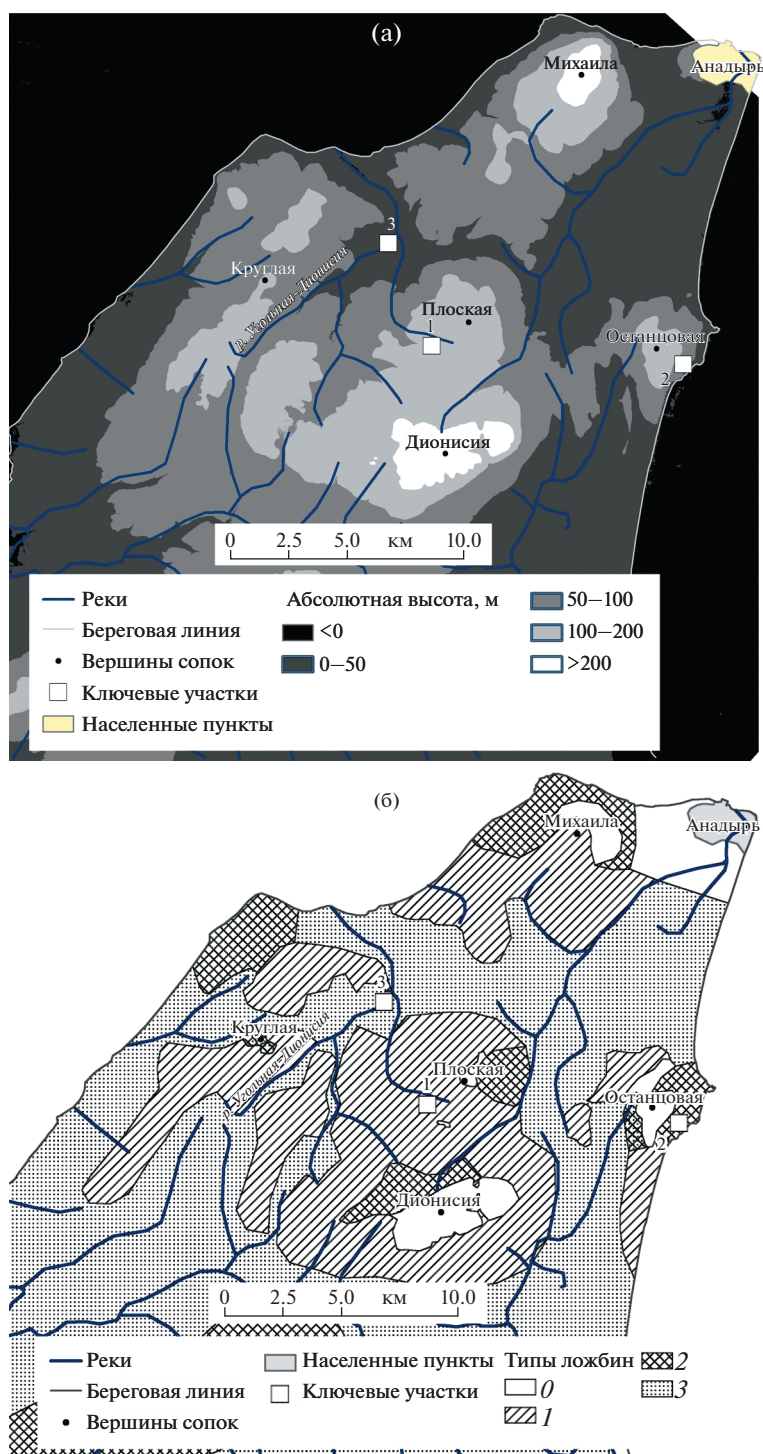


Рис. 1. Расположение ключевых участков полевых исследований: (а) – на гипсометрической карте (построенной на основе ArcticDEM), (б) – на карте преобладающих типов ложбин.

Ложбины: 0 – ложбинный рельеф не выражен (нарушенные территории, скальные выходы на вершинах сопек), 1 – веерного типа, 2 – переплетающегося типа, 3 – одиночные. *Ключевые участки:* 1 – “Ягодный”, 2 – “Останцовая”, 3 – “Базовый”.

МЕТОДЫ

На основе дешифрирования снимков высокого разрешения, доступных через систему Google Earth [15], были выбраны три ключевых участка,

характеризующихся разным рисунком ложбинной сети и наименее затронутых антропогенной деятельностью (рис. 1). На выбранных участках проводились описания морфологии ложбин от их истоков до устьев, характера растительного по-

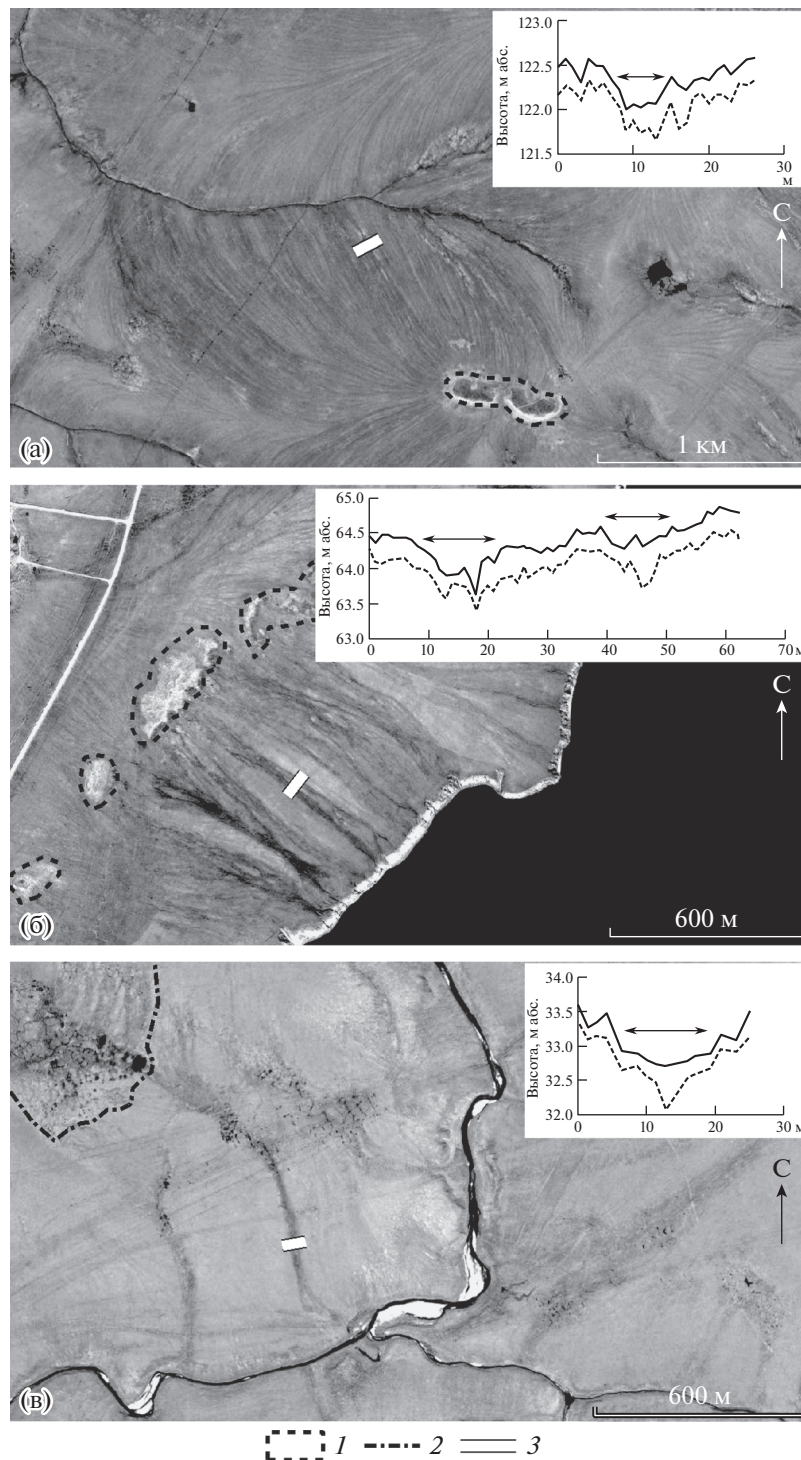


Рис. 2. Разные типы склоновой ложбинной сети на космических снимках Google Earth и поперечные профили ложбин: (а) – веерный (субпараллельный) тип, ключевой участок “Ягодный”, (б) – переплетающийся тип, ключевой участок “Останцовая”, (в) – одиночный тип, ключевой участок “Базовый”.

1 – выходы скальных пород; 2 – полигональное верховое болото; 3 – расположение поперечных профилей (внемасштабный знак). Обозначения линий на графиках: сплошная линия – поверхность грунта; пунктирная линия – кровля мерзлых пород на конец июня – начало июля; двойные стрелки – днища отдельных ложбин.

крова, микро- и нанорельефа и состава слагающих склон поверхностных отложений. На характерных участках ложбин проведено нивелирование поперечных профилей с одновременным

измерением глубины протаивания при помощи мерзлотного щупа.

При камеральных исследованиях по космическим снимкам проводился анализ распростране-

Таблица 1. Характеристики типов ложбинной дренажной сети в окрестностях г. Анадырь (Чукотка)

Характеристика	Тип ложбин (ключевой участок)		
	верный (“Ягодный”)	переплетающийся (“Останцовый”)	одиночный (“Базовый”)
Рисунок ложбинной сети в плане	Параллельные дугообразные или прямые полосы, немного расходятся вниз	Пересекающиеся под острыми углами прямолинейные или слегка изогнутые полосы	Одиночные, расширяются в верхней и нижней частях, иногда сходящиеся и расходящиеся, образующие ячейки
Абс. высоты, м	100–190	30–120	15–40
Ширина ложбин, м	5–7	7–20, шире, в местах пересечения нескольких ложбин	15–20, расширяется вверх и вниз до 40 м
Глубина ложбин, м	0.2–0.4	0.2–0.3	0.5–1
Длина ложбин, м	900–1200	800	600–1000
Примерная площадь водосбора, га	5	10	20
Расстояние между соседними ложбинами, м	10–40	Переменная густота от 10 до 80 м, иногда сходятся и расходятся	250–300
Начало (исток)	Почти или на водоразделе, сложенном скальными породами	Ниже выходов скальных пород на крутом склоне сопки	На заболоченном междуречье, занятом полигональным болотом
Конец (устье)	Впадает в ручей, в устье расплывается	Висячие на абразионном обрыве с эрозионными врезами в днище	Заканчивается конусом солифлюкционным языком с переслаивающимися суглинком и торфом
Крутизна днища ложбины	От 5° в верхней и средней, до 2° в нижней частях склона	6–7°	0.5° в верхней, до 4.5° в нижней частях склона
Характер профиля склона (выпуклый, вогнутый, прямой)	Вогнутый	Вогнутый или прямой	Выпуклый
Экспозиция склона	Любая, на северном склоне выражены отчетливе	Любая	Любая
Состав склоновых отложений	Супесь с редким гравием	Супесь с прослоями разнo-зернистого песка и щебнем в нижней части разреза	Супеси однородные
Геоморфологическое положение, глубина залегания скальных пород	Склоны платообразных междуречий, бронированных покровами туфов и лав, в привершинных частях залегающими на поверхности или близко к поверхности	Склоны вулканических сопок, с неглубоким (до 3 м) залеганием скальных вулканических пород, обнажающихся в привершинных частях сопок и в устьевых уступах	Склоны пологоувалистых междуречий и террас, сложенных рыхлыми четвертичными образованиями: ледниковыми, флювиогляциальными, морскими

Таблица 1. Окончание

Характеристика	Тип ложбин (ключевой участок)		
	веерный (“Ягодный”)	переплетающийся (“Останцовый”)	одиночный (“Базовый”)
Процессы на склонах (по внешним признакам)	Солифлюкция (грядово-мочажинный рельеф), пучение (пятна-медальоны)	Эрозия, делювиальный смыв (наличие свежего наилка и эрозионных борозд)	Солифлюкция (грядово-мочажинный рельеф), мерзлотное пучение по бортам (пятна-медальоны, торфяные бугры) термокарст (вытянутые обводненные понижения, иногда образующие полигональный рисунок)
Полигональность (признаки наличия ПЖЛ)	Полигональность не прослеживается на близлежащих склонах и междуречьях, но ручьи имеют четкообразный рисунок в плане	Полигональность не выражена	Протаивающие полигоны прослеживаются на близлежащих склонах и междуречьях, а также в верхней части днища ложбины
Средняя глубина протаивания в днище, см / рядом по данным измерений на профилях, см	32/28 Различия несущественны	26–56/30 Переменная в зависимости от заполнения днища: под неактивными заторфованными – меньше, а под активными – больше, чем на окружающих склонах	70/30 Более глубокое в днище
Наличие незадернованных участков в ложбинах (сток наносов, эрозия)	Полностью задернованы и покрыты торфом	Частично задернованы, но встречаются зоны размыва и аккумуляции наносов	Полностью задернованы и покрыты торфом
Растительность, ландшафт	В ложбинах – грядово-мочажинные заболоченные кустарничково-пушицевые тундры; между ложбинами – крупно-кочкарная кустарничковая разнотравно-мохово-пушицевая тундра	В ложбинах – полосы ольхового стланика и кустарниковой ивы с разнотравно-моховой растительностью в нижнем ярусе; между ложбинами – крупно-кочкарная кустарничковая мохово-пушицевая тундра	В ложбинах – чередование осоково-сфагнумовых мочажин, разнотравно-злаковых луговин и куртин березки тощей; между ложбинами – кустарничковые мохово-пушицевые крупно-кочкарные тундры

ния ложбин описанных типов в пределах рассматриваемого участка. Определялись их морфометрические характеристики (длина, ширина), структура ложбинной сети – расстояния между соседними ложбинами, рисунок в плане и др. По цифровой модели местности ArcticDEM (пространственное разрешение 2 м) [16] с использованием стандартных методов обработки в пакете ArcGIS определялись характерные абсолютные высоты, длины, уклоны и форма склонов, характерные для ложбин каждого типа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В окрестностях г. Анадыря были выявлены три доминирующих морфологических типа структу-

ры ложбинной сети: 1) веерный (субпараллельный); 2) переплетающийся; 3) одиночный (рис. 2, табл. 1).

Ложбины с веерным (субпараллельным) рисунком представлены на ключевом участке “Ягодный” (рис. 2, а). Характерной особенностью является наличие густой субпараллельной полосчатости рисунка ложбин на космическом снимке с интервалом между ложбинами от 10–20 м в верхней и до 40 м в нижней частях склона. Ложбины прямолинейны или слегка изогнуты в плане и веерообразно расходятся от обнажающихся на вершине сопки выходов туфопесчаников. При отсутствии выходов коренных пород ложбины начинаются непосредственно на водоразделе. Несмотря на четкий полосчатый рисунок на космическом

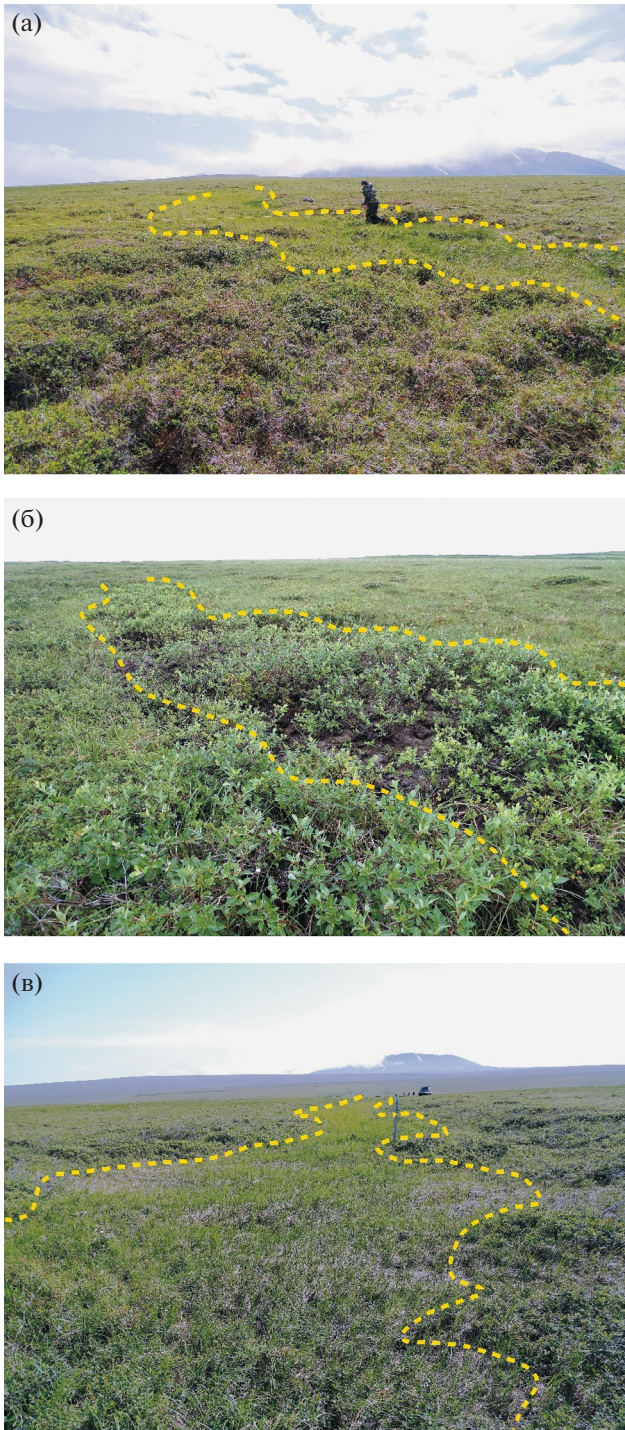


Рис. 3. Наземные фотографии ложбин разных типов: (а) – веерный (субпараллельный) тип, ключевой участок “Ягодный”; (б) – переплетающийся тип, ключевой участок “Останцовая”, правая ложбина на профиле, приведенном на рис. 2, б; (в) – одиночный тип, ключевой участок “Базовый”. Пунктирной линией показаны контуры ложбин.

снимке, ложбины этого типа очень плохо выражены на местности (рис. 3, а).

Веерные ложбины характерны для вогнутых солифлюкционных склонов с крутизной от 2 до

5°. Они являются преобладающим типом ложбин на отметках 100–200 м, хотя встречаются и ниже. Среди окружающих кочкарных тундр они выделяются повышенным увлажнением, грядово-мочажинным нанорельефом и микроступенчатостью тальвега. В устье ложбины распластываются, поверхностный водоток рассредоточивается. Склоновый материал представлен супесями с редким включением дресвы. В конце июня поверхностный сток, связанный с протаиванием деятельного слоя, наблюдался на ложбинах северного склона, но отсутствовал на южном.

Определения глубины протаивания по поперечным профилям, проведенные 29.06.2019, показали незначительные различия между днищами ложбин и прилегающими склонами, хотя кровля мерзлых пород под ложбинами расположена немного ниже за счет общего изменения высоты дневной поверхности (рис. 2, а). Мощность торфа в днище ложбины (30 см) незначительно превышает мощность торфа на остальной части склона (0–20 см), что свидетельствует о повышенном увлажнении ложбин.

Эрозионные процессы в днищах ложбин веерного типа в естественном состоянии не развиты. Однако в связи с искусственной концентрацией стока воды в результате проезда вездехода нами наблюдались перехват стока нескольких ложбин по колею проезда и образование эрозионной рытвины глубиной 0.8 м в днище одной из ложбин. В рытвине образовался водоток, а глубина протаивания под тальвегом достигла 75 см, что в 2.5 раза превышало глубину протаивания на бровках и в днищах соседних ложбин.

Переплетающиеся ложбины представлены на участке “Останцовая” (рис. 2, б). Они располагаются на отметках 30–120 м, приурочены к склонам вулканических сопок, крутизной 6–7° – наиболее крутым из рассмотренных.

На исследованном участке ложбины начинаются ниже скальных выходов и развалов глыб изверженных пород и обрываются на абразионном уступе высотой 30 м. Характерной особенностью ложбин этого типа является закустаренность ольхой и ивой, свидетельствующая о хорошей дренированности склона (рис. 3, б). Отличительной особенностью ложбин переплетающегося типа является наличие в днищах некоторых из них грубообломочного материала в верхней части ложбин, а в нижней – плаща свежих наносов алевритового состава, перекрывающих торф и кустарники, что свидетельствует о процессах делювиального смыва и накопления. При этом днища расположенных рядом ложбин нередко находятся на различных гипсометрических уровнях (рис. 2, б). На приведенном рисунке днище левой ложбины не несет следов недавнего стока, заросло мхом и заполнено торфом на глубину более 30 см. Днище правой ложбины, расположенной

на 30 см выше левой, перекрыто толщей свежих наносов, достигающих мощности 20 см, и подстилается чередованием прослоев торфа и ила (рис. 3, б). Глубина протаивания в днище левой ложбины не превышает 25 см, а правой ложбине достигает 50–60 см, что вероятно, объясняется ее большей водоносностью. Аккумуляция наносов в ложбинах периодически приводит к перестройке путей стока, что и образует пересекающийся ветвящийся рисунок ложбинной сети.

В устьевой части ложбин на ключевом участке наблюдались эрозионные врезы глубиной 1.5–2 м, в обрывах которых вскрыты переслаивающиеся алевритистые супеси с прослоями растительного детрита, грубого песка и щебня.

Одиночные ложбины изучены на ключевом участке “Базовый” на левом берегу р. Угольной-Дионисия в ее среднем течении (рис. 2, в и 3, в). Ложбины этого типа расположены на склонах уплощенных тундровых увалов, на наиболее низких гипсометрических уровнях (менее 40–60 м), в аккумулятивных толщах морских, моренных или водноледниковых отложений, как правило, с развитыми полигонально-жильными льдами. Они более широкие и глубокие по сравнению с предыдущими типами и расположены на значительном расстоянии друг от друга (250–300 м). Особенностью ложбин является их приуроченность к выпуклым склонам. Крутизна днища у таких ложбин минимальна среди описанных трех их типов и составляет от 0.5° в верхней до 4.5° в нижней части склона (в средней части – $1-2^\circ$). Источником водного питания ложбин этого типа являются верховые полигональные болота, реже термокарстовые озера, расположенные в их истоках. Глубина протаивания в днище ложбины на участке “Базовый” к началу июля достигала 80 см по сравнению с 30 см на бровках, что является максимальным среди всех типов ложбин (рис. 2, в, табл. 1). Мощность торфа в днище и на склонах в нижней части ложбины составляет 30–35 см. Устье ложбины расположено на пойме р. Угольной-Дионисия и выражено в виде солифлюкционного конуса, в толще которого прослеживается переслаивание торфа с супесью и суглинком.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Выделенные типы ложбин приурочены к разным гипсометрическим уровням, поверхностям с разным геологическим строением и крутизной. Ложбины веерного типа встречаются преимущественно на верхнем гипсометрическом уровне – междуречьях, бронированных вулканогенно-осадочными породами. Полого изогнутые очертания, равные расстояния между ложбинами и их параллельность, а также то, что они могут начинаться практически на водоразделе, указывают на то, что их структура соответствует линиям тече-

ния грунта. Это позволяет предположить соответствие веерной ложбинной сети описаниям С.С. Воскресенского [7], согласно которым сток воды по ложбинам наследует неровности поверхности, создаваемые площадной солифлюкцией. В свою очередь, повышенное увлажнение ложбин по сравнению с межложбинными пространствами способствует большим скоростям смещения по ним грунта. К такому же выводу приходит Е.Д. Трохим при описании выделенных ей ложбин второго типа (“narrow”) в предгорьях Аляски [10]. По наличию грядово-мочажинного рельефа в нижних частях склонов ложбины веерного типа также похожи на первый класс ложбин Аляски – “mineral-flark”. Как отмечает Е.Д. Трохим, эти два типа ложбин сменяют друг друга вниз по склону. Веерные ложбины имеют наибольшую густоту и наименьшую глубину среди других рассмотренных типов ложбин. Они полностью перекрыты мхом и торфом, что препятствует размыву грунта. Развитию термокарста препятствует относительно невысокая обводненность этих ложбин, обусловленная их большой густотой. Проявления полигональных структур под ложбинами веерного типа на рассмотренном участке отсутствуют. Однако русло ручья, в который впадают ложбины, имеет четковидное строение, что может быть признаком наличия полигонально-жильных льдов [17]. Хорошо выраженные полигональные структуры под ложбинами веерного типа наблюдаются на участках, нарушенных антропогенной деятельностью. Так, у подножия горы Дионисия на юго-западном склоне, нарушенном проездами техники, можно заметить вторичные процессы вытаивания полигонально-жильных льдов под днищами веерных ложбин, которые приводят к изменению их рисунка с плавного изогнутого на коленчатый (рис. 4). Отсутствие проявления полигональных структур под ложбинами в естественном состоянии, вероятно, свидетельствует о достаточно больших скоростях солифлюкционного смещения грунта, которое быстро уничтожает следы процессов мозаичного растрескивания и термокарста.

К склонам вулканических сопок с близким залеганием скальных пород приурочены переплетающиеся ложбины. В них наблюдаются чередующиеся по длине процессы эрозии и аккумуляции наносов, выраженные в виде свежих аккумулятивных шлейфов и эрозионных борозд. Об этом также свидетельствуют характерная слоистость отложений и наличие перепадов высот между соседними ложбинами. Аккумуляция наносов приводит к регулярной (в многолетнем плане) смене путей стока, что и формирует специфичный переплетающийся рисунок ложбинной сети. Эрозионным процессам способствуют повышенные по сравнению с другими типами ложбин уклоны, незадернованные участки склонов в верхних частях со-

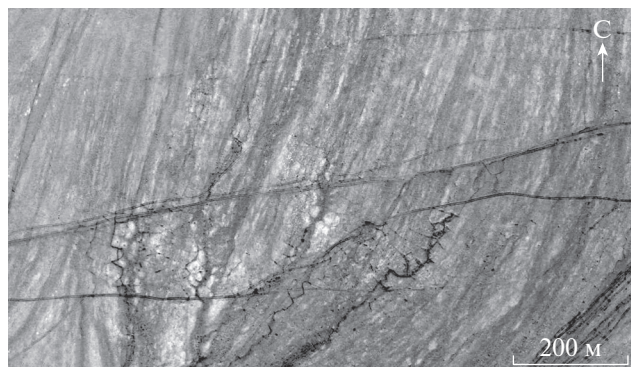


Рис. 4. Проявление структуры полигонально-жильных льдов под днищами веерных ложбин у подножия горы Дионисия на юго-западном склоне в результате нарушения поверхности проездами вездеходов (на снимке GoogleEarth).

пок, длительно залегающие в верховьях снежники, гольцовые льды. Развитие термокарста и солифлюкции в таких ложбинах маловероятно из-за близкого залегания скальных пород, грубого состава отложений, хорошего дренажа и отсутствия мощных подземных льдов. К этому типу ложбин, вероятно, близок тип “steep” (“крутой”) из выделенных на Аляске [10]. Предположительно, переплетающиеся ложбины являются одним из вариантов развития ложбин веерного типа при активизации эрозионной деятельности потока: увеличения уклонов или поверхностного стока. Об этом свидетельствует тот факт, что ложбины веерного и переплетающегося типов могут сменять друг друга на соседних участках одного склона, различающихся по крутизне, например, на восточном и западном склонах г. Плоской.

На самом низком и наиболее обширном по площади гипсометрическом уровне (высоты <math><40-50\text{ м}</math>), представленном на Анадырской низменности, распространение получила разреженная сеть одиночных ложбин, которые также могут соединяться между собой. Описанная нами одиночная ложбина является лишь одним из вариантов морфологии ложбин, формирующихся в рыхлых отложениях, но имеет с ними общие черты. Одиночные ложбины широкие, имеют малые уклоны, расположены на значительном расстоянии друг от друга, образуются в рыхлых отложениях, часто с развитыми полигонально-жильными льдами. В них наблюдается высокая обводненность, обусловленная наличием постоянного источника питания в виде полигональных верховых болот или термокарстовых озер в истоках, чего не наблюдается в ложбинах других типов. Наряду с процессами солифлюкции, развитыми преимущественно в нижней, более крутой, части склона, в образовании этих ложбин большую роль играет термокарст, что выражается в значительно большей глубине протаивания в ее днище

по сравнению с окружающими склонами, наличием многочисленных заполненных водой понижений, нередко образующих коленчатый рисунок. Вероятно, одиночные ложбины могут иметь множество форм в зависимости от литологии пород. Возможно, одним из подвидов одиночных ложбин является выделенный на Аляске тип “organic-rich” (“богатый органикой”) [10]. Из-за широкого распространения полигонально-жильных льдов в рыхлых отложениях следует ожидать наибольшей подверженности ложбин этого типа развитию термоэрозионных процессов при изменении термических условий.

Изменение механизмов развития ложбин в связи с изменением природных условий, вероятно, происходило в прошлом и может произойти в будущем. О смене растительности в процессе эволюции ложбин свидетельствует разный состав торфа и современной растительности в ложбинах Аляски [10]. Более активное развитие эрозионных процессов в днищах ложбин могло происходить в прошлом в условиях разреженной растительности. Активизация эрозионных и термокарстовых процессов возможна и в результате усиления гумидности климата и увеличения глубины сезонного оттаивания на фоне общего потепления [18], а также техногенного воздействия, связанного с механическим разрушением почвенно-растительного покрова склонов.

Таким образом, в пределах небольшой территории наблюдается ложбинная сеть разной морфологии, структуры и механизмов образования. Схожая по структуре ложбинная сеть наблюдается и в других регионах криолитозоны, например, на севере Аляски. Несмотря на то что по ложбинам происходит концентрация стока воды на склонах, на образование ложбин существенное влияние оказывают криогенные процессы, и, наоборот, повышенное увлажнение днищ ложбин способствует развитию в них солифлюкции и термокарста. Это подтверждает полигенетичность и парагенетичность процессов формирования малых флювиальных форм рельефа, особенно в таких специфических условиях, как криолитозона. Морфология ложбин и рисунок ложбинной сети имеют четкую связь с их геоморфологическим положением, составом подстилающих пород, а через них и обводненностью, и сопутствующими криогенными процессами.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 20-05-00840 (А.М. Тарбеева), № 18-05-60036 (О.Д. Трегубов), № 20-35-70027 (Л.С. Лебедева), и по плану НИР (ГЗ) АААА-А16-116032810084-0. Авторы выражают благодарность Б.И. Гарцману, К.К. Уяганскому, М.А. Нуте-

векет, Е.В. Шекману, А. Уяганскому и И. Уяганскому за помощь при проведении полевых работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mumm K.L.* К вопросу о природе деллей Даалдынского района // Вопросы географии. 1959. Сб. 46. С. 28–34.
2. *Kane D.L., Hinzman L.D., Benson C.S., and Liston G.E.* Snow hydrology of a headwater Arctic basin. *Water Resources Research*. 1991. Vol. 27. No. 6. P. 1099–1109.
3. *McNamara J.P., Kane D.L., and Hinzman L.D.* An analysis of streamflow hydrology in the Kuparuk River Basin, Arctic Alaska: a nested watershed approach. *Journal of Hydrology*. 1998. No. 206. P. 39–57.
4. Четырехязычный энциклопедический словарь терминов по физической географии / Сост. И.С. Щукин. М.: Советская энциклопедия, 1980. 703 с.
5. *Еременко Е.А., Панин А.В.* Ложбинный мезорельеф Восточно-Европейской равнины. М.: МИРОС, 2010. 192 с.
6. *Катасонова Е.Г.* Роль термокарста в развитии деллей // Условия и особенности развития мерзлых толщ в Сибири и на Северо-Востоке. М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 91–100.
7. *Воскресенский С.С.* Динамическая геоморфология. Формирование склонов. М.: МГУ, 1971. 230 с.
8. *Hall K.* Zoological erosion in permafrost environments: A possible origin of dells? *Polar Geography*. 1997. Vol. 21. No. 1. P. 1–9.
9. *McNamara J.P., Kane D.L., and Hinzman L.D.* An analysis of an Arctic channel network using a digital elevation model. *Geomorphology*. 1999. No. 29. P. 339–353.
10. *Trochim E.D., Jorgenson M.T., Prakash A., and Kane D.L.* Geomorphic and biophysical factors affecting water tracks in northern Alaska. *Earth and Space Science*. 2016. No. 3. P. 123–141.
11. *Tarbeeveva A., Lebedeva L., Efremov V., Shamov V., and Makarieva O.* Water tracks in the lower Lena River basin. *E3S Web of Conferences*, 163:04007, 2020. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016304007>
12. *Государственная геологическая карта Российской Федерации.* Карта четвертичных образований. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Сер. Чукотская. Лист Q-60 – Анадырь. Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2016.
13. Справочно-информационный портал “Погода и климат”. Анадырь [Электронный ресурс]. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/climate/25563.htm> [дата обращения 20.03.2020]
14. *Zamolodchikov D.G., Kotov A.N., Karelin D.V., and Razzhivin V.Y.* Active-Layer Monitoring in Northeast Russia: Spatial, Seasonal, and Interannual Variability. *Polar Geography*. 2004. Vol. 28. No. 4. P. 286–307.
15. GoogleEarth [Электронный ресурс]. URL: <https://www.google.com/earth/> [дата обращения 30.10.19].
16. *Porter C., Morin P., Howat I., Noh M.-J., Bates B., Peterman K., Keeseey S., Schlenk M., Gardiner J., Tomko K., Willis M., Kelleher C., Cloutier M., Husby E., Foga S., Nakamura H., Platon M., Wethington M.J., Williamson C., Bauer G., Enos J., Arnold G., Kramer W., Becker P., Doshi A., D'Souza C., Cummins P., Laurier F., and Bojesen M.* ArcticDEM [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/>, Harvard Dataverse, VI, 2018 [дата обращения 30.10.19]. <https://doi.org/10.7910/DVN/OHNUKH>
17. *Hopkins D., Karlstrom T., Black R., Williams J.R., Pewe T.L., Fernald A.T., and Muller E.H.* Permafrost and ground water in Alaska. *Geol. Surv. Prof. Pap.* 264 F. Washington. 1955. 146 p.
18. *Liljedahl, A.K., Boike J., Daanen R.P., Fedorov A.N., Frost G.V., Grosse G., Hinzman L.D., Iijma Y., Jorgenson J.C., Matveyeva N., Necsoiu M., Raynolds M.K., Romanovsky V., Schulla J., Tape K.D., Walker D.A., Wilson C., Yabuki H., and Zona D.* Pan-Arctic ice-wedge degradation in warming permafrost and its influence on tundra hydrology. *Nature Geoscience*. 2016. No. 9. P. 312–318.

Patterns of the slope drainage network of the permafrost in the area of Anadyr

A. M. Tarbeeveva^{a, #}, O. D. Tregubov^b, and L. S. Lebedeva^c

^aLomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

^bNorth-East Interdisciplinary Scientific Research Institute, Far East Branch of RAS, Magadan, Russia

^cMelnikov Permafrost Institute RAS, Yakutsk, Russia

[#]E-mail: amtarbeeveva@yandex.ru

Water runoff on the slopes of the permafrost zone passes through a network of hollows of various structures and patterns in plan. This is clearly distinguishable on aerial and satellite images, but often poorly distinguished on the ground. The study is aimed at recognizing the reasons for the difference in the structure of the drainage network, which is necessary for understanding the mechanisms of surface runoff generation and the modern relief formation in the permafrost areas. In the vicinity of Anadyr (Chukotka, Russia), three morphological types of the hollow network were identified. In the areas of distribution of each type of hollow network field observations were made, and the morphometric characteristics of the slopes to which they are associated were obtained from the digital surface model and satellite images. Each type of the hollow network corresponds to definite range of altitude, the type of relief, the slope gradient and profile, the composition of the deposits, and the depth of seasonal thawing. It has been established that although all types of troughs are used by temporary streams, they have different mechanisms of development. The hollows with a fan structure form the densest parallel network with a distance of 10–40 m apart. These are characteristic of concave slopes of interfluves with close bedding of bedrock and are the result of fluvial modeling of irregularities formed as a

result of uneven sliding of the slope material (gelifluction). The intertwining troughs are confined to the slopes of the volcanic hills, the steepest of the studied ones. Fresh silty sediments have been observed at their bottoms and their formation is associated with erosional processes. Single hollows located at a considerable (200–300 m) distance from each other are formed in loose quaternary deposits with a developed network of ice-wedge-polygons. The role of thermokarst is significant in their deepening.

Keywords: dells, water tracks, permafrost, cryogenic slope processes, slope drainage network, seasonally thawed layer

ACKNOWLEDGMENTS

The reported study was funded by RFBR, projects No. 20-05-00840 (A.M. Tarbeeva), No. 18-05-60036 (O.D. Tregubov), No. 20-35-70027 (L.S. Lebedeva), and contributes to the State Task No. AAAA-A16-116032810084-0, Faculty of Geography MSU. Authors thank B.I. Gartsman; K.K. Uyagansky; M.A. Nuteveket, E.V. Sheckman, A. Uyagansky and I. Uyagansky for fieldwork assistance.

REFERENCES

- Mitt K.L. *K voprosu o prirode dellei Daldynskogo raiona*. (On the nature of dells in the Daldyn diamond region). *Voprosy geografii*. 1959. Vyp. 46. P. 28–34. (in Russ.)
- Kane D.L., Hinzman L.D., Benson C.S., and Liston G.E. Snow hydrology of a headwater Arctic basin. *Water Resources Research*. 1991. Vol. 27. No. 6. P. 1099–1109.
- McNamara J.P., Kane D.L., and Hinzman L.D. An analysis of streamflow hydrology in the Kuparuk River Basin, Arctic Alaska: a nested watershed approach. *Journal of Hydrology*. 1998. No. 206. P. 39–57.
- Chetyrekh'yazychnyi entsiklopedicheskii slovar' terminov po fizicheskoi geografii*. (The four-language encyclopedic dictionary of terms in physical geography). Sost. I.S. Shchukin. M.: Sovetskaya entsiklopediya (Publ.), 1980. 703 p. (in Russ.)
- Eremenko E.A. and Panin A.V. *Lozhibinnyi mezorel'ef Vostochno-Evropeiskoi ravniny*. (Hollow mesorelief of the East European plain). M.: MIROS (Publ.), 2010. 192 p. (in Russ.)
- Katasonova E.G. *Rol' termokarsta v razvitiu dellei*. (The role of thermokarst in the development of dells). *Usloviya i osobennosti razvitiya merzlykh tolshch v Sibiri i na Severo-Vostoke*. M.: Izd-vo AN SSSR (Publ.), 1963. P. 91–100. (in Russ.)
- Voskresenskii S.S. *Dinamicheskaya geomorfologiya. Formirovanie sklonov*. (Dynamic geomorphology. The formation of slopes.). M.: MGU (Publ.), 1971. 230 p. (in Russ.)
- Hall K. Zoological erosion in permafrost environments: A possible origin of dells? *Polar Geography*. 1997. No. 21:1. P. 1–9.
- McNamara J.P., Kane D.L., and Hinzman L.D. An analysis of an Arctic channel network using a digital elevation model. *Geomorphology*. 1999. No. 29. P. 339–353.
- Trochim E.D., Jorgenson M.T., Prakash A., and Kane D.L. Geomorphic and biophysical factors affecting water tracks in northern Alaska. *Earth and Space Science*. 2016. No. 3. P. 123–141.
- Tarbeeva A., Lebedeva L., Efremov V., Shamov V., and Makarieva O.* Water tracks in the lower Lena River basin. E3S Web of Conferences, 163:04007, 2020. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016304007>
- Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. Karta chetvertichnykh obrazovaniy. Mashtab 1:1000000 (tret'e pokolenie). Seriya Chukotskaya. List Q-60 – Anadyr'*. (State geological map of the Russian Federation. Quaternary sediments. Scale 1:1000000 (third generation. A Series of Chukotka. Sheet Q-60-Anadyr.). SPb: Kartograficheskaya fabrika VSEGEI (Publ.), 2016.
- Spravочно-информационный портал "Погода и климат". Anadyr' [Elektronnyi resurs]*. (Reference and information portal "Weather and climate". Anadyr [Electronic source]). URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/climate/25563.htm> [accessed on 20.03.2020] (in Russ.)
- Zamolodchikov D.G., Kotov A.N., Karelin D.V., and Razzhivin V.Y. Active-Layer Monitoring in Northeast Russia: Spatial, Seasonal, and Interannual Variability. *Polar Geography*. 2004. Vol. 28. No. 4. P. 286–307.
- Google Earth* [Electronic source]. URL: <https://www.google.com/earth/> [accessed on 30.10.19].
- Porter C., Morin P., Howat I., Noh M.-J., Bates B., Peterman K., Keeseey S., Schlenk M., Gardiner J., Tomko K., Willis M., Kelleher C., Cloutier M., Husby E., Foga S., Nakamura H., Platson M., Wethington M.J., Williamson C., Bauer G., Enos J., Arnold G., Kramer W., Becker P., Doshi A., D'Souza C., Cummings P., Laurier F., and Bojesen M. *ArcticDEM* [Electronic source]. URL: <https://doi.org/10.7910/DVN/OHHUKH>, Harvard Dataverse, V1, 2018 [accessed on 30.10.19].
- Hopkins D., Karlstrom T., Black R., Williams J.R., Pewe T.L., Fernald A.T., and Muller E.H. Permafrost and ground water in Alaska. *Geol. Surv., Prof. Pap. 264 F* Washington, 1955. 146 p.
- Liljedahl, A.K., Boike J., Daanen R.P., Fedorov A.N., Frost G.V., Grosse G., Hinzman L.D., Iijma Y., Jorgenson J.C., Matveyeva N., Necsoiu M., Reynolds M.K., Romanovsky V., Schulla J., Tape K.D., Walker D.A., Wilson C., Yabuki H., and Zona D. Pan-Arctic ice-wedge degradation in warming permafrost and its influence on tundra hydrology. *Nature Geoscience*. 2016. No. 9. P. 312–318.