

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОД СУШИ С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

УДК 551.340

ПРИЗНАКИ И ЗНАЧЕНИЕ СТРУКТУР ПОДПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА НА ТЕРРИТОРИИ КРИОЛИТОЗОНЫ¹

© 2021 г. И. В. Чеснокова^{a, *}, А. П. Безделова^b, Д. О. Сергеев^c,
Н. И. Тананаев^d, Е. А. Гришакина^e

^aИнститут водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

^bИнститут глобального климата и экологии им. Ю.А. Израэля, Москва, 107258 Россия

^cИнститут геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Москва, 101000 Россия

^dИнститут мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, 677010 Россия

^eИнститут геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского, Москва, 119991 Россия

*e-mail: ichesn@rambler.ru

Поступила в редакцию 24.09.2020 г.

После доработки 24.09.2020 г.

Принята к публикации 30.03.2021 г.

Подповерхностный водный сток на территории криолитозоны обладает значительной структурной и сезонной спецификой. Структурность связана, с одной стороны, с литологически обусловленными проницаемыми областями массивов горных пород, с другой стороны – с геокриологически обусловленной проницаемостью. Эта проницаемость – сезонный фактор водного стока с территории, который в последнее время активно изучается исследователями различных направлений. Структурность обусловлена историей геологического и геокриологического развития: чаще всего структуры стока унаследованы положением пород более грубого литологического состава или особенностями, связанными с протеканием в прошлом геокриологических процессов (растрескивания, формирования криогенных текстур, локального термокарста и др.). Рассмотрена пространственная неоднородность надмерзлотного стока на Европейском Севере и горах Северного Забайкалья.

Ключевые слова: грунтовый сток, многолетняя мерзлота грунтов, растительные сообщества, индикаторы, глубина сезонного оттаивания.

DOI: 10.31857/S0321059621050060

ВВЕДЕНИЕ

Подземный сток обычно подразделяют на подмерзлотный, межмерзлотный, внутримерзлотный и надмерзлотный [6]. Режим подмерзлотных и межмерзлотных вод относительно консервативен, поскольку относится к области замедленного водообмена (не считая высокопроницаемых коллекторов в горных областях). Надмерзлотные воды сезонноталого слоя (СТС) и таликов разного типа (“подповерхностный водный сток”) высоко динамичны и активно влияют на сезонные особенности речного стока. Подповерхностный водный сток на территории криолитозоны обладает значительной структурной и сезонной спецификой. Структурность связана, с одной стороны, с литологически обусловленными проницаемыми областями массивов горных пород, с другой стороны – с геокриологически

обусловленной проницаемостью горных пород. Проницаемость массивов горных пород обусловлена историей геологического и геокриологического развития: чаще всего структуры стока унаследованы положением пород более грубого литологического состава или криолитологическими неоднородностями тонкодисперсных грунтов, связанными со следами палеогеокриологических процессов (растрескивания, формирования криогенных текстур, локального термокарста и др.).

Геокриологически обусловленная проницаемость – сезонный фактор промерзания и оттаивания, влияние которого на общий сток территории в последнее время активно изучается исследователями различных направлений и специализаций [9, 10, 13]. Влияние геокриологических условий и геокриологической динамики на режим водного стока представляется очевидным и поддается количественным оценкам [7].

Надмерзлотные воды имеют более динамичный режим и обладают сложной структурой в плане и разрезе. Структурность стока приводит к

¹ Работа подготовлена в рамках государственных заданий (темы НИР, государственная регистрация АААА-А19-119021190077-6 и АААА-А19-119040990079-3).

пространственному перераспределению и концентрации потоков надмерзлотных вод, которые питаются атмосферными осадками, талыми снеговыми водами, водами оттаивающих мерзлых грунтов, водами конденсации в поровом пространстве грунта. В зонах концентрации надмерзлотного стока воды больше и, как правило, движение воды быстрее.

Задача настоящего продолжающегося исследования — выявление признаков и оценка распространенности структурированного грунтового стока в пределах таких различных природных обстановок, как Арктический Север Европейской равнины и Становое нагорье в Северном Забайкалье.

РАЙОНЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Основными источниками информации о структуре и режиме надмерзлотного стока служат материалы мерзлотной съемки. Стандартный набор методов инженерных изысканий малоприменим для решения этой задачи, поскольку требуются поисковые специализированные исследования границ водных потоков, скоростей фильтрации и уровня режима грунтовых вод на протяженных участках, не совпадающих с границами проектирования инженерных сооружений.

Юго-Восточная часть Большеземельской тундры

Авторы воспользовались возможностями студенческой геокриологической съемки, проводимой в рамках Учебной инженерно-геокриологической практики магистров геологического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова, проводимой ежегодно в районе г. Воркуты на учебно-научном полигоне Хановой. На площади ~1 км² выполняется ландшафтная съемка, проводится бурение скважин с опробованием грунта, круглогодичные режимные термометрические наблюдения, а также специализированные гидрологические исследования. При ландшафтном картировании используются снимки космические и снимки с радиоуправляемого квадрокоптера “Mavic 2 Zoom”.

Характерная особенность региона — повсеместное распространение крупнобугристой (крупноблочной) структуры мезорельефа, основные части которой — поверхность блока и его склоны различной морфологии. Высота блоков составляет от 0.5 до 2 м при поперечных размерах 50–70 м на 25–45 м. На основных структурных элементах макрорельефа (водораздел, склон, речная долина) крупнобугристая структура различна.

Крупнобугристая структура на пологих склонах мусюргов и водораздельных котловин представлена отдельными разрозненными бугра-

ми, занимающими от 20 до 35% площади поверхности. Бугры разделены широкими и неглубокими ложбинами (средняя ширина 15–20 м) и имеют выраженную подсклоновую часть, склоны и собственно поверхность блока; иногда подсклоновая структурная часть отсутствует. В переходной зоне между блоками и ложбинами встречаются маленькие зарастающие озерки-лужи с фрагментами сфагновых сообществ. На дне водораздельных котловин и в речной долине преобладает крупнобугристо-западинный комплекс мезорельефа, представленный сочетанием крупнобугристых структур различных форм (средний размер 70–50 м на 25–40 м, высота 1.0–2.5 м), соединенных небольшими (1.5–4.0 м) и неглубокими (0.5–1.0 м) межбугровыми понижениями. В мезорельефе крупнобугристой структуры водораздельных котловин преобладают относительно невысокие равномерные боковые склоны, переходящие в неглубокие и неширокие межбугровые понижения. Присклоновые структурные части фрагментарны по берегам верховьев ручьев. Редкие бугры пучения и крупные торфяники, разделенные заболоченными понижениями, занимают небольшие площади по окраинам термокарстовых озер и озерков. Крупнобугристая структура в речной долине р. Воркуты наиболее выражена с преобладанием вытянутой формы блоков в сторону реки с общим уклоном 1°–2°.

Горы Северного Забайкалья

Второй район геокриологических исследований относится к Северному Забайкалью и включает в себя Чарскую межгорную котловину рифтового типа и обрамляющие ее горные хребты Удокан и Кодар, абсолютные высоты которых достигают соответственно 2200 и 3000 м. Днище котловины имеет абсолютные отметки ~700 м. Котловина заполнена преимущественно песками ледникового и водно-ледникового происхождения, причем мощность четвертичных отложений достигает 1 км. Тектоническое строение территории имеет блоковый характер. Глубинный тепловой поток весьма изменчив по территории [1], что совместно со сложной геокриологической историей, связанной с оледенениями и развитием подпрудных ледниковых озер, обусловило неоднородную мощность многолетнемерзлых толщ (ММТ). В пределах Чарской котловины описаны как обширные участки без многолетней мерзлоты (урочище Пески), так и аномальные мощности ММТ, достигающие 450 м [2]. Под водораздельными участками горных хребтов мощность ММТ достигает 900 м; мерзлота имеет сплошное распространение [8]. Температура горных пород на глубине проникновения сезонных колебаний в районе исследований также весьма изменчива в разных ландшафтах и меняется от –7 до +2°С [3].

Распространенность крупнообломочных отложений усложняет проходку скважин и шурфов на склонах, и авторы активно исследовали участки подрезки склонов автомобильными подъездными дорогами, прослеживая пути стока по хорошо слышимому с поверхности журчанию воды.

СТРУКТУРЫ ПОДПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА

Юго-Восточная часть Большеземельской тундры

За историю развития рельефа и геокриологических условий сформировался широко распространенный в Большеземельской тундре крупно-блоковый ландшафт (рис. 1). Блоки-бугры скованы высокотемпературной многолетней мерзлотой (среднегодовая температура на глубине проникновения сезонных колебаний близка к -0.5°C) со слоем сезонного оттаивания, который полностью промерзает зимой (рис. 2а). Отсутствие кустарничковой растительности приводит к уменьшению толщины снежного покрова на поверхности бугров, способствуя их выхолаживанию. В пределах межблочных понижений, напротив, зимнее промерзание с поверхности не достигает кровли ММТ благодаря аккумуляции снега, мощному органическому горизонту почвы и его высокой влажности (рис. 2б).

Структура сети подповерхностного стока связана со структурой ландшафта. На приводораздельных участках, где уклон поверхности невелик и также невелика область аккумуляции стока, возникают небольшие округлые термокарстовые западины диаметром от 10 до 50 м, питающие полосы стока. Одна западина может давать начало нескольким полосам стока, расходящимся в разных направлениях. В настоящее время линейные размеры и влагосодержание таких котловин увеличиваются, о чем свидетельствует мелко-кочкарниковый рельеф их окраинных частей – берега котловин как бы разваливаются под отепляющим влиянием подповерхностных вод. В полосах стока обильно разрастается карликовая березка, что локально увеличивает снегонакопление и способствует растеплению поверхностных слоев почвы.

Ниже по рельефу на склонах долины в области транзита стока рисунок сети подповерхностного стока меняется с веерообразного на перистый. Несколько полос объединяются в одной осевой долине, к которой под прямым углом прилегают полосы стока, причем одна такая полоса стока может разгружаться одновременно в обе соседние осевые долины. Последние, как правило, достаточно глубоко вложены в окружающий рельеф и в отдельные периоды года могут иметь поверхностный сток. Индикатор присутствия поверхностного стока – резкая смена карликовой

березки на тальник при уменьшении мощности органического горизонта.

В придолинной части уклон поверхности уменьшается, что способствует увеличению общей увлажненности, расширению и заболачиванию межбугровых понижений, развитию термокарста. В осевых долинах наблюдается постоянный поверхностный сток. Следовательно, в верхних частях склонов характер и структура рельефа определяют рисунок сети подповерхностного стока, тогда как в придолинных частях, напротив, именно обилие почвенной влаги – важный фактор развития крупноблочного ландшафта.

Разновозрастные термокарстовые явления, наблюдавшиеся Воркутинской мерзлотной станцией с 1936 г., свидетельствуют о наличии вековой тенденции растепления многолетней мерзлоты и уменьшения площади ее распространения в этом районе [4]. Изменение размеров мерзлых массивов по разрезу и по простираению неминуемо должно было влиять на режим стока с территории. Этот вопрос остается недостаточно изученным, и в его разрешении необходимо учитывать наличие структуры каналов с переменной проницаемостью грунтов.

Несливающаяся мерзлота (участки, где ее кровля находится глубже сезонного промерзания) в межбугровых понижениях создает условия для продолжения питания поверхностных водотоков в воднокритический период из талого просяга грунта, мощность и гранулометрический состав которого весьма изменчивы по площади. Частичное промерзание водоненасыщенных надмерзлотных таликов может создавать избыточный “криогенный” напор, распространяющийся вверх по склонам крупных бугров и локально приводящий к эжекции перенасыщенного водой грунта. Вероятно, именно так возникают многочисленные пятна-медальоны, полосами окаймляющие долины крупных полос подповерхностного стока.

Морфология ложбинной структуры стока определяется положением мерзлотных границ блоков-бугров и разделяющих их межбугровых понижений. Относительная площадь полос грунтового стока, по данным дешифрирования, составляет 15–25%, и это в целом соответствует геофизическим и термометрическим данным, полученным в результате мерзлотной съемки (рис. 3). Однако положение границ этих полос пока не обеспечено надежными ландшафтными индикаторами, а их динамика остается недоизученной, как и пространственные закономерности неоднородности условий фильтрации. Известны данные даже о новообразовании мерзлоты на фоне потепления климата [5].

Пространственная неоднородность грунтового стока требует учета при моделировании режима водного стока с территории. Летом, в частно-

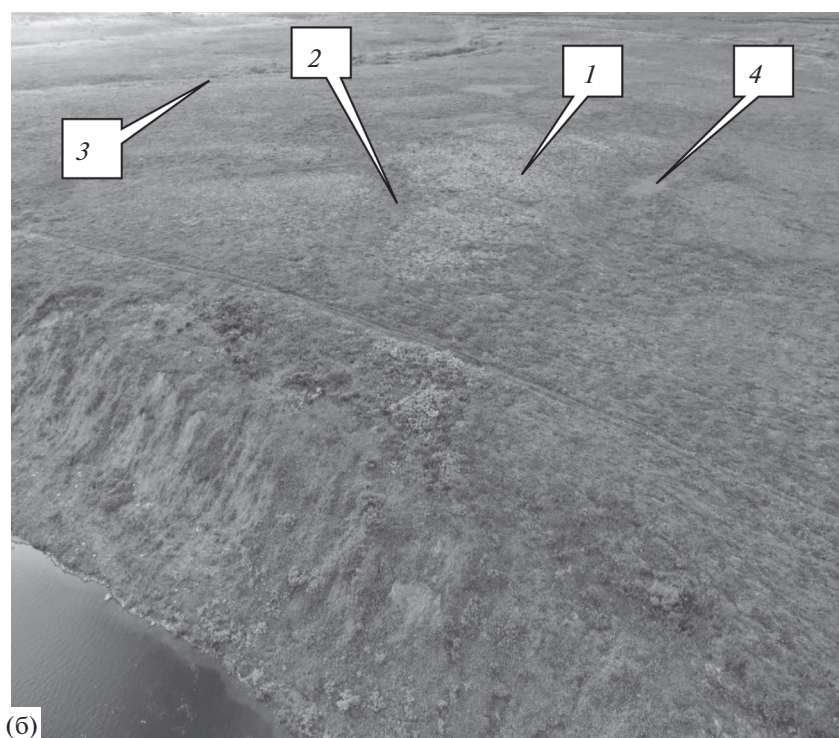
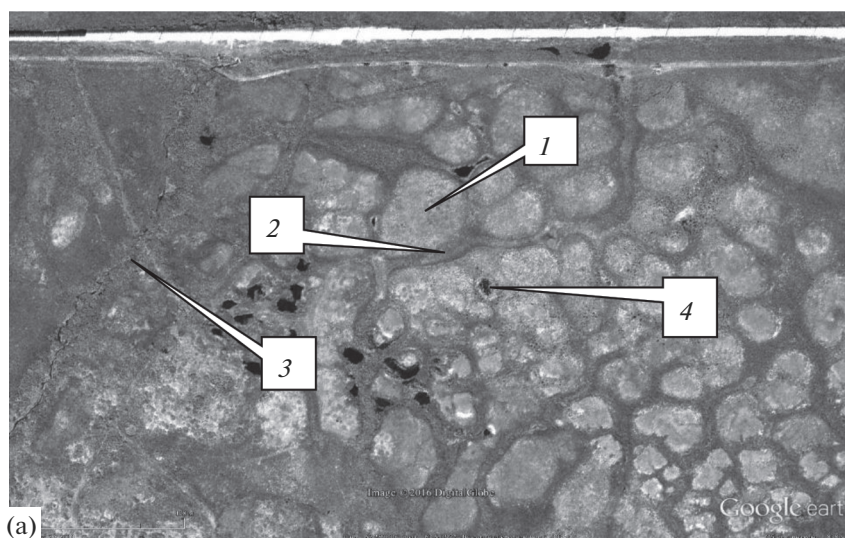


Рис. 1. Характерный облик ландшафта Большеземельской тундры в районе ст. Хановой: а – космоснимок Google, б – перспективный снимок с квадрокоптера; 1 – минеральные бугры; 2 – межбугровые понижения; 3 – поймы рек и ручьев; 4 – термокарстовые озера и обводненные понижения.

сти, существует гетерогенная система фильтрации, при которой атмосферные осадки, попадая на блоки-бугры, частично стекают с их выпуклой поверхности, а частично – насыщают относительно тонкий СТС, в первой половине лета обладающий повышенной проницаемостью из-за остаточных макропор, наследующих сезонные криогенные текстуры. Большая часть атмосфер-

ной влаги насыщает межбугровые понижения. Коэффициенты фильтрации здесь невелики, но кровля мерзлоты залегает глубже 4 м, и, что самое важное, фильтрация продолжается круглый год. Водообеспечение грунтового стока в водокритический период доказывается сохранением стока в ручьях – притоках р. Воркуты, что хорошо видно при анализе температурного режима в рус-

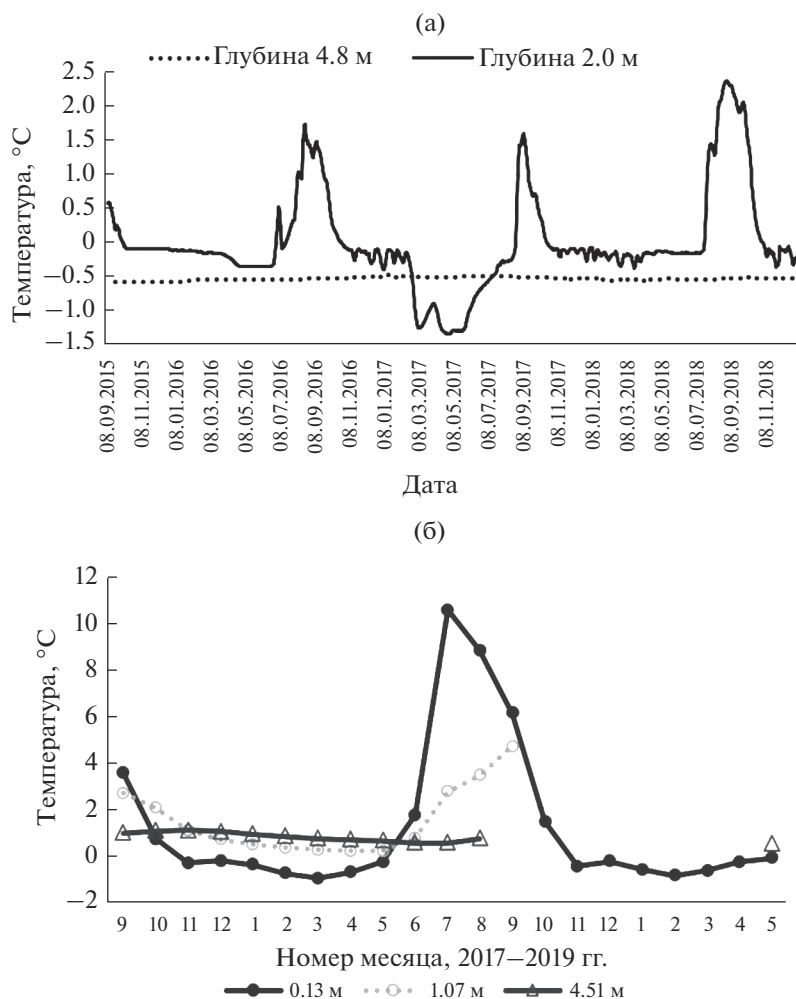


Рис. 2. Температурный режим грунта на разной глубине на возвышенных (а) и пониженных (б) участках рельефа.

ле одного из них (рис. 4). Нулевая температура сохраняется в русле, несмотря на пятидесятиградусные морозы.

Отсутствие поверхностного движения воды в полосах стока и межбугровых понижениях объясняется хорошей водоудерживающей способностью и высоким коэффициентом фильтрации мощного органического горизонта [11]. Возникновение поверхностного стока возможно в период быстрого весеннего снеготаяния, однако в это время коэффициент поверхностного стока, вероятно, лишь очень локально $>50\%$. Основная часть влагозапаса в снеге при снеготаянии расходуется на инфильтрацию в снежный покров и частично — на испарение с поверхности снега, которое может достигать от 20 до 30% суммарного влагозапаса [14, 15]. По данным наблюдений 1977–1979 гг. на стоковых площадках в долине р. Томсен (Канадский Арктический архипелаг), на слабонарушенной задернованной поверхности приводораздельного склона коэффициент поверхностного

стока менялся от 3 до 26% при влагозапасе в снежном покрове от 200 до 300 мм и лишь за бровкой террасы, где суммарный влагозапас >700 мм, достигал 74% [12]. В летний период с оттаиванием сезоннопромерзающего слоя уровень грунтовых вод (УГВ) находится в органическом горизонте почвы, что обеспечивает высокую скорость фильтрации и ограничивает подъем УГВ выше дневной поверхности.

Горы Северного Забайкалья

Надмерзлотные воды СТС в пределах рассматриваемой территории повсеместно распространены и приурочены ко всем геолого-генетическим типам четвертичных отложений. Это преимущественно поровые воды с коротким периодом существования (от 3 до 6 мес.). Воды СТС движутся в виде струйчатых потоков по криогенному водоупору (гольцовый лед или мерзлые супесчано-песчаные отложения) или по скальному основанию. Потоки надмерзлотных вод СТС по мере

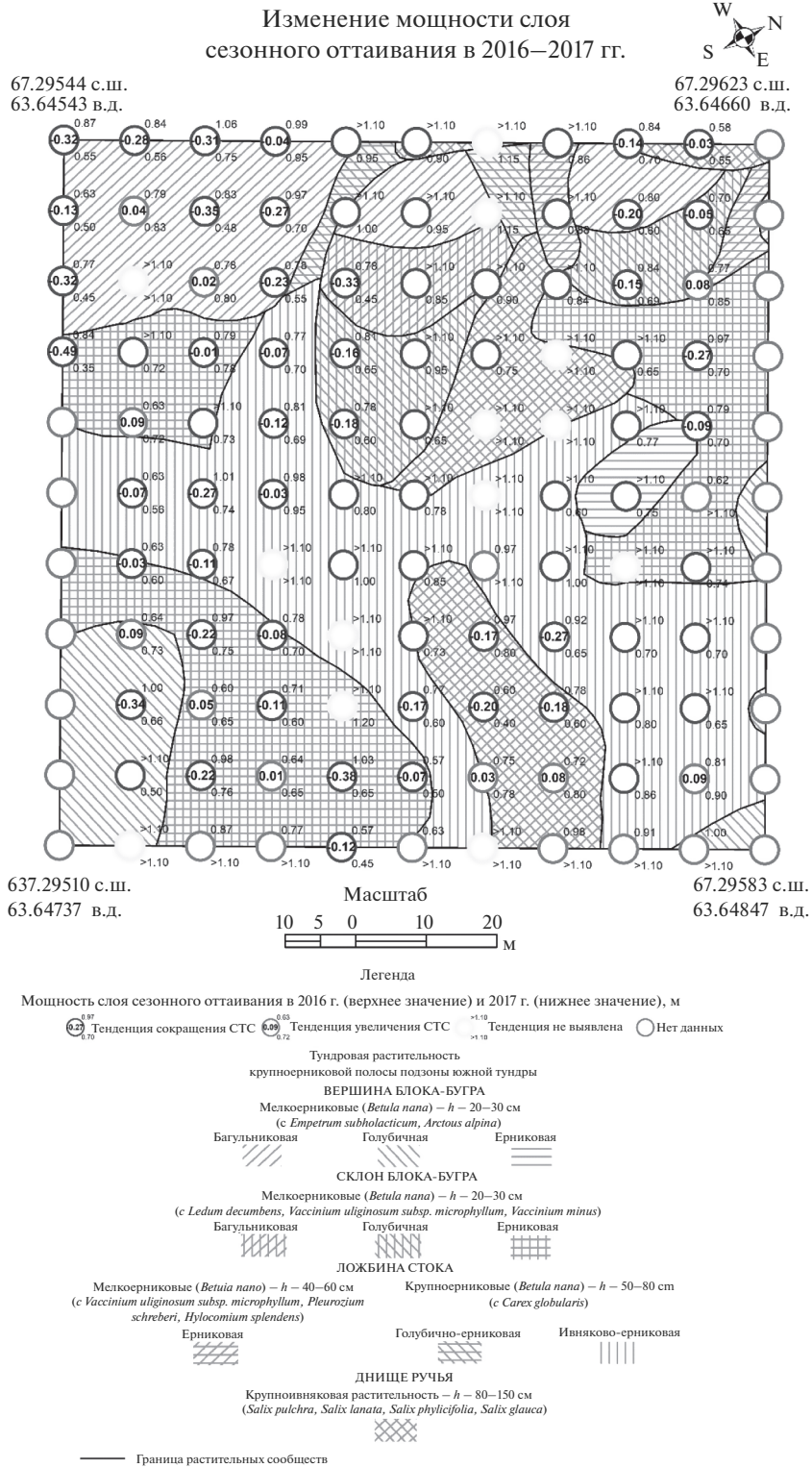


Рис. 3. Межгодовая динамика глубины сезонного оттаивания в пределах различных типов местности на участке Хановей.

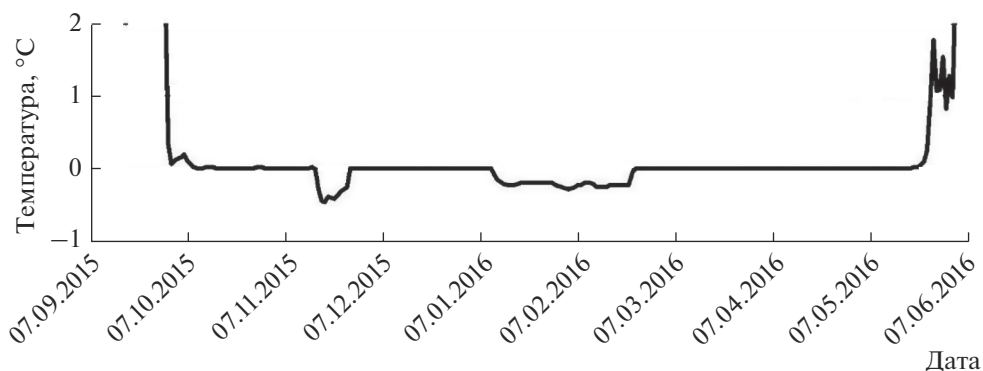


Рис. 4. Зимняя динамика температуры на дне ручья – притоке р. Воркуты.

своего движения переходят из элювиальных образований в образования склонового ряда, затем – в аллювиальные отложения, представляя собой в гидравлическом отношении единое целое, и имеют свободный уровень. Колебания уровня вод СТС обусловлены понижением криогенного водоупора по мере сезонного оттаивания и обогревающего действия атмосферных осадков. Частичная разгрузка надмерзлотных вод СТС происходит в местах перегибов склонов, у тыловых швов террас, а также в местах подрезки дорогами. В горно-таежном поясе это приводит к формированию небольших осенних наледей объемом до 10 м^3 .

Водный сток в этих районах формируется под влиянием процессов конденсации влаги в крупнообломочных отложениях и гольцового льдообразования весной и в первой половине лета. Процесс гольцового льдообразования начинается ранней весной при отрицательной температуре воздуха в дневные часы за счет радиационных оттепелей, вызывающих снеготаяние. При радиационном нагревании поверхности выступающих над снежным покровом обломков до положительной температуры снег при контакте с ними тает, а образующаяся вода затекает в пустоты и замерзает там в виде небольших гнезд, корочек или сосулек (так называемый “гольцовый лед”). В это же время происходит интенсивная абляция льда на нижних поверхностях обломков в верхней части разреза СТС. В конце весны – начале лета верхние горизонты гольцового льда в СТС подтаивают и образующаяся вода затекает с последующим замерзанием в более глубокие горизонты курума, которые еще имеют отрицательную температуру. Таким образом, слой гольцового льда постепенно перемещается до глубины максимальной сезонной оттаивания в данный год. В некоторых случаях, когда запасы холода в СТС превосходят тепловыделение замерзающей в куруме талой снеговой воды, дополнительное количество гольцового льда может сформироваться за

счет первых весенне-летних дождей. Вследствие этого острота пика весеннего паводка смягчается.

Другой важный процесс, влияющий на водный сток в рассматриваемом районе, – конденсация влаги в грунте. По материалам работы экспедиции БАМ геологического факультета МГУ в 1983–1988 гг., в курумах формируется до 50 мм конденсационной влаги за летний сезон. Эта вода, соединяясь с водой оттаивающего в течении лета сезонного гольцового льда и влагой атмосферных осадков, промывает каналы, свободные от мелкозема в крупнообломочных отложениях, которые маркируются “на слух” по интенсивному журчанию воды, а также иногда по относительному понижению поверхности их тальвега благодаря суффозионному выносу обломочного материала и/или пониженному положению кровли ММТ (рис. 5).

Попытка оценить относительную площадь и геометрию таких полос концентрированного надмерзлотного стока привела авторов к неожиданному выводу, что эти полосы не приурочены преимущественно к курумам, но встречаются и на участках супесчано-песчаных солифлюкционно-делювиальных отложений, покрытых растительностью, включая лиственницу и кедровый стланик (рис. 6).

В тех местах, где насыпи и полки дорог пересекают подобные полосы стока, легко возникают размывы, которые развиваются как с подгорной, так и с нагорной частей дорожного полотна (рис. 7). На самой дорожной насыпи при этом возникают просадки, обусловленные суффозионным выносом мелкообломочного материала. На участках дренирования вод подповерхностного стока легко возникают оползни-сплывы, связанные с локальным переувлажнением тонкого слоя почвы.

Попытка определить геометрию подобных полос концентрированного стока на склоне показала кажущуюся хаотичность их путей. Структура стока оказалась не древовидной, некоторые пото-

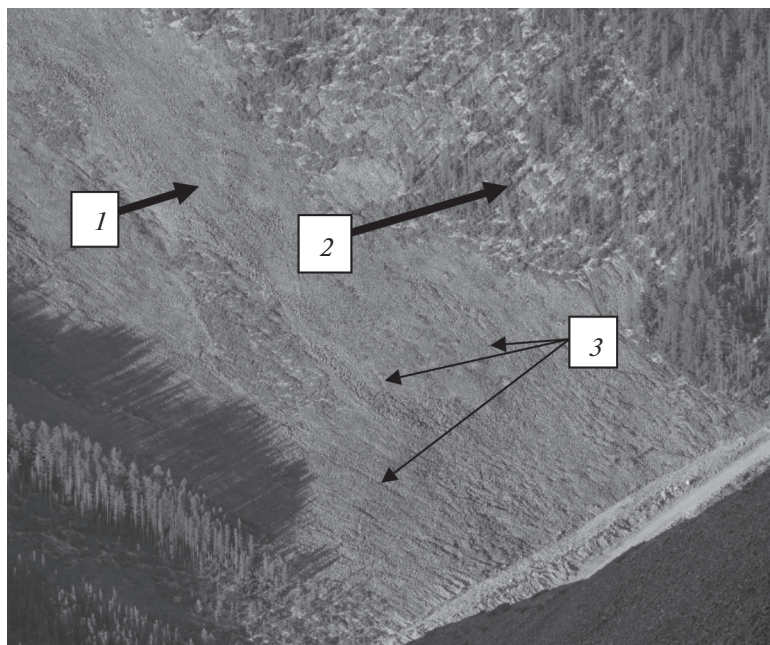


Рис. 5. Общий вид курума “Тешин огород” на правом борту руч. Клюквенного (хребет Удокан): 1 – курум; 2 – делювиально-солифлюкционный склон; 3 – полосы стока (фото Д. Сергеева).



Рис. 6. Разгрузка надмерзлотных вод по полосе промытых солифлюкционно-делювиальных отложений (фото И. Чесноковой).

ки ветвятся вниз по склону, а затем сливаются вновь. Средний интервал между полосами по простиранию склона составляет 30 м, при этом интенсивные потоки чередуются с относительно маловодными.

Важное следствие неоднородности грунтового стока в подгольцовом поясе — увеличение скоро-

сти дренирования атмосферных осадков из-за увеличения скорости стекания в полосах крупно-обломочного материала. Одновременно это приводит к ускоренному распространению загрязняющих веществ при очень слабой естественной защищенности надмерзлотных вод от загрязнения с поверхности при освоении территории.



Рис. 7. Размыв полотна и нагорного откоса дороги Удокан—Наминга в 2018 г. на участке их пересечения полосами под-поверхностного стока (показаны стрелками) (фото Д. Сергеева).

ВЫВОДЫ

В Большеземельской тундре перераспределение надмерзлотного стока обусловлено историей геокриологического развития территории, которое изучено недостаточно. Сформированная система блоков-бугров и межблоковых понижений создала современную неоднородность теплообмена, при которой несливающаяся мерзлота в понижениях обеспечивает возможность грунтового стока в зимний период, при которой она влияет на геокриологические условия через распределение снежного покрова и микрорельеф, что под-держивает зимний сток в мелких ручьях.

В Северном Забайкалье перераспределение и концентрация стока в крупнообломочных поло-сах стока во всех типах склоновых четвертичных отложений увеличивает энергию и скорость дре-нирования. Развитие гольцового льдообразова-ния и конденсации в промытых крупнообломоч-ных отложениях полос стока существенно влияет на гидрограф водотоков разного порядка и требует дальнейшего изучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дучков А.Д., Соколова Л.С. Геотермический атлас Сибири // Закономерности строения и эволюции геосфер. Матер. Международ. междисциплинар. науч. симпоз. Хабаровск, 2004. С. 45–56.
2. Железняк М.Н. Геотемпературное поле и криоли-тозона Юго-Востока Сибирской платформы. Дис. ... докт. геол.-минерал. наук. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО РАН, 2002. 337 с.
3. Железняк М.Н. Геотемпературное поле и криоли-тозона Юго-Востока Сибирской платформы. Но-восибирск: Наука, 2005. 227 с.
4. Редозубов Д.В. Геотермический метод исследова-ния толщ мерзлых пород. М.: Наука, 1966. 156 с.
5. Ривкин Ф.М., Власова Ю.В., Пармузин И.С. Законо-мерности изменения геокриологических условий в результате осадки мерзлых пород при оттаивании // Криосфера Земли. 2017. Т. XXI. № 6. С. 26–34.
6. Романовский Н.Н. Подземные воды криолитозоны / Под ред. В.А. Всеволожского. М.: Изд-во МГУ, 1983. 231 с.
7. Сергеев Д.О., Романовский Н.Н., Гаврилов А.В., Бул-дович С.Н., Типенко Г.С., Йошикава К., Романов-ский В. Влияние динамики климата и геокриоло-гических условий на режим регионального стока и наледообразования горных водосборов бассейна реки Лена // Криосфера Земли. 2009. Т. XIII. № 3. С. 29–35.
8. Шасткевич Ю.Г. Многолетнемерзлые породы вы-сокогорной части хребта Удокан и условия форми-рования их температурного режима // Геокриоло-гические условия Забайкальского Севера. Новоси-бирск: Наука, 1966. С. 24–43.
9. Akhtar M., Ahmad N., Booij M.J. Use of regional cli- mate model simulations as input for hydrological mod- els for the Hindukush-Karakorum-Himalaya region // Hydrol. Earth System Sci. 2009. V. 13 (7). P. 1075–1089.
10. Cannon R.F., Quinton W.L. Changing runoff pathways due to permafrost thaw in discontinuous permafrost

- terrains / Eds *F. Günther, A. Morgenstern*. XI Int. Conf. Permafrost – Book of Abstracts. Potsdam, Germany: Bibliothek Wissenschaftspark Albert Einstein, 2016. P. 625.
<https://doi.org/10.2312/GFZ.LIS.2016.001>.
11. *Letts M.G., Roulet N.T., Comer N.T., Skarupa M.R., Versegny D.L.* Parametrization of peatland hydraulic properties for the Canadian land surface scheme, // *Atmosphere–Ocean*. 2000. V. 38 (1). P. 141–160.
 12. *Lewkowicz A.G., French H.M.* The hydrology of small runoff plots in an area of continuous permafrost, Banks Island, N.W.T. // *Proc. 4th Canadian Permafrost Conf.* 1982. P. 151–162.
 13. *Liljedahl A.K., Boike J., Daanen R.P. et al.* Pan-Arctic ice-wedge degradation in warming permafrost and its influence on tundra hydrology // *Nat. Geosci.* 2016. V. 9. P. 312–318.
 14. *Pomeroy J.W., Gray D.M., Brown T., Hedstrom N.R., Quinton W.L., Granger R.J., Carey S.K.* The cold regions hydrological model: a platform for basing process representation and model structure on physical evidence // *Hydrol. Processes*. 2007. V. 21. P. 2650–2666.
 15. *Ryden B.E.* Hydrology of Truelove Lowland // *Truelove Lowland, Devon Island, Canada: A High Arctic Ecosystem* / Ed. *L.C. Bliss*. Edmonton, AB: Univ. of Alberta Press, 1977. P. 107–136.