ГЕОЭКОЛОГИЯ. ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ. ГИДРОГЕОЛОГИЯ. ГЕОКРИОЛОГИЯ, 2023, № 5, с. 28–42

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 551.435:551.343

О ПРИЧИНАХ ЗАТУХАНИЯ ТЕРМОСУФФОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА БЕСТЯХСКОЙ ТЕРРАСЕ р. ЛЕНЫ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ

© 2023 г. Л. А. Гагарин[1,*], В. В. Оленченко[2,], Н. А. Павлова[1]**

[1]ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, ул. Мерзлотная, 36, Якутск, 677010 Россия

[2]ФГБУН Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, пр. Академика Коптюга, 3, Новосибирск, 630090 Россия

**E-mail: gagarinla@gmail.com*

***E-mail: olenchenkovv@yandex.ru*

Поступила в редакцию 02.05.2023 г.
После доработки 16.05.2023 г.
Принята к публикации 19.05.2023 г.

В статье приведены результаты исследований термосуффозионных процессов в области разгрузки межмерзлотных вод в долине руч. Улахан-Тарын в Центральной Якутии. С помощью геофизических исследований методом электротомографии и термометрии, а также анализа ландшафтных условий территории установлены факторы, способствующие затуханию термосуффозии в песчаных отложениях IV (бестяхской) надпойменной террасы р. Лена. В ходе исследований прослежены сукцессионные стадии восстановления растительности в зонах аккумуляции песчаного материала, вынесенного подземным потоком. Смена сукцессионных рядов сопровождается изменением геокриологических условий в области разгрузки подземных вод, вплоть до полного ее промерзания. Изучена современная мерзлотно-гидрогеологическая обстановка в местах прекращения разгрузки подземных вод, и предложена концепция ее изменения при нарушении устойчивости многолетнемерзлых пород, перекрывающих водоносный горизонт. Благоприятные условия для промерзания водовыводящей зоны создаются после формирования подземной полости и обрушения ее мерзлой кровли. Перекрытие путей подземного стока способствует восстановлению мерзлоты внутри массива горных пород и изолированию зоны выноса пород, разрушенных термосуффозией. Таким образом, совокупность внутренних (затруднение водообмена) и внешних (сукцессия растительных сообществ) факторов является причиной затухания термосуффозионных процессов на бестяхской террасе р. Лена.

Ключевые слова: *термосуффозия*, *межмерзлотные воды*, *надмерзлотные воды*, *талик*, *многолетнемерзлые породы*, *сукцессия*, *электротомография*

DOI: 10.31857/S0869780923040045, **EDN:** GZMBSP

ВВЕДЕНИЕ

В области криолитозоны на площадях распространения песчаных отложений один из опасных процессов, повышающий риск снижения устойчивости инженерных сооружений, – термосуффозия. Разные авторы называли этот процесс зимней напорной механической суффозией [16], суффозией [21]. В зарубежной литературе T. Czudek, J. Demek, [24], C. Embleton, J. Thornes, [25] под термосуффозией (thermo-suffosion) предлагается рассматривать последнюю стадию термокарстового процесса, связанную с вымыванием мелких частиц грунта водами, образованными в результате таяния подземного льда. В представленной статье под этим термином понимается оттаивание дисперсных многолетнемерзлых горных пород (ММП) под воздействием тепла фильтрующихся подземных вод, последующее гидромеханическое разрушение породного массива и вынос из него материала [6]. Наиболее активно термосуффозионные процессы, сопровождающиеся деструктивными образованиями (провалами, воронками, оползнями) происходят в криолитозоне в области разгрузки подземных вод. Известны случаи развития этого процесса на Забайкальской железной дороге [16] в пределах массива эоловых Чарских песков в Забайкалье. Авторы данной работы наблюдали термосуффозионные провалы в населенных пунктах г. Якутск и пос. Нижний Бестях. В обоих случаях они были связаны с оттаиванием грунтов вокруг подземных водонесущих коммуникаций и выносом частиц грунта при утечке воды. В Центральной Якутии изучение динамики термосуффозионных процессов проводилось вблизи зоны групповой разгрузки межмерзлотных вод в урочище руч. Улахан-

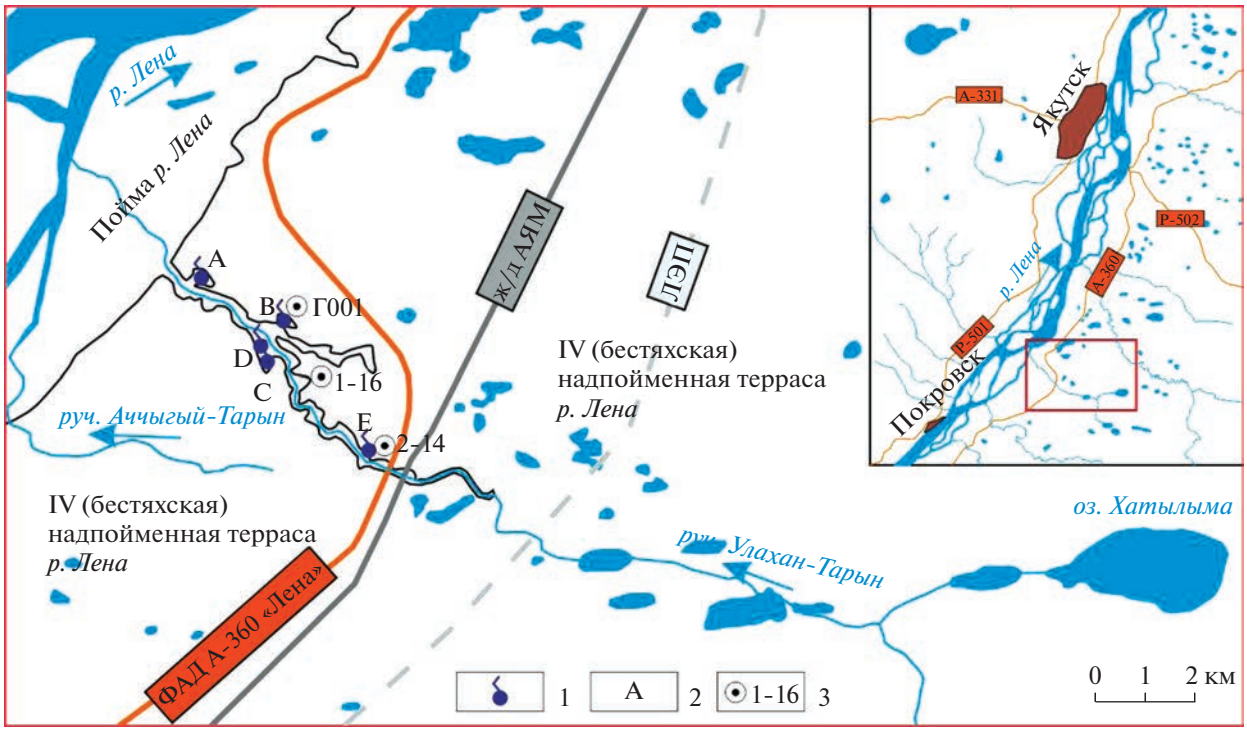

Рис. 1. Схема расположения исследуемого участка: 1 – родник межмерзлотных вод; 2 – название термосуффозионного цирка, к которому приурочены родники; 3 – скважина и ее номер.

Тарын [5, 6, 13, 21]. Существенная активизация провалообразования на этом участке началась в 2009 г. и была спровоцирована увеличением обводненности таликов в предыдущие три года. По данным геодезических исследований за 4 года объем термосуффозионных понижений здесь составил более 260 тыс. м^3 [6].

Цель настоящего исследования – детализация механизма затухания термосуффозионного процесса и оценка влияния природных факторов на его режим.

ХАРАКТЕРИСТИКА УЧАСТКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Участок исследований расположен на правобережье р. Лена (рис. 1) в пределах IV (бестяхской) надпойменной террасы [7, 9]. Рельеф террасы пологоволнистый с заросшими формами эоловой аккумуляции, вытянутыми водно-эрозионными понижениями, занятыми озерами глубиной 2–4 м. Склон террасы крутой, высотой до 15–30 м.

В литологическом строении участка принимают участие четвертичные пески, преимущественно однородные мелкой фракции, с гравийно-галечниковым слоем в основании. В верхней части разреза до глубины 2–7 м пески косослоистые, в нижней части – горизонтально- и волнистослоистые, переслаивающиеся с тонкозернистым песком и алевритом [15]. Песчаную толщу подстилают среднекембрийские выветрелые известняки [9, 10].

Геокриологические условия в пределах бестяхской террасы р. Лена сложные. Мощность ММП изменяется от 200 до 420 м [9, 13, 14]. Их температура в основании слоя годовых теплооборотов на выровненных участках в сосновом редколесье составляет –0.2°С, в межгрядовых понижениях и речных долинах понижается до –2.5°С [3]. В толще рыхлых четвертичных отложений широко распространены водоносные субаэральные надмерзлотные и межмерзлотные талики, нередко гидравлически связанные с водами подозерных таликов. Дренирование надмерзлотно-межмерзлотного водоносного горизонта осуществляется в долинах рек и ручьев, прорезающих бестяхскую террасу. Участки выходов подземных вод на поверхность зимой фиксируются наледями. В зоне разгрузки подземных вод из-за высокого значения градиента напора (I = 1.1) активизируются термосуффозионные процессы [6]. Вынос песчаного материала, слагающего матрикс водоносного горизонта и его оттаявшей мерзлой кровли, осуществляется в пределах долины водотока, к которой приурочен родник (рис. 2а). На поверхности террасы образуются провальные формы рельефа (воронки, поноры, блоковые просадки поверхности и др.), а в ее уступе – циркообразные понижения (рис. 2б). Наиболее высокодебитная

(а) (б)

Рис. 2. Песчаный конус выноса в цирке E (а) и обзорный вид цирков (б) в долине руч. Улахан-Тарын (фото Л.А. Гагарина).

группа родников, где ярко проявлена термосуффозия, приурочена к нижнему течению руч. Улахан-Тарын – правого притока р. Лена (см. рис. 1). В долине этого ручья в настоящее время действует 5 групповых выходов подземных вод (A, B, C, D и E) с суммарным дебитом, изменяющимся в зависимости от водности лет от 176 до 550 л/с. Изобилие в долине руч. Улахан-Тарын циркообразных форм рельефа, заросших березняками и лиственничниками, свидетельствует о существовании в недалеком прошлом и других мест разгрузки подземных вод.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для выявления областей некогда существовавших зон разгрузки межмерзлотных подземных вод в долине руч. Улахан-Тарын были проведены дешифрирование космоснимков и маршрутные описания местности на выделенных участках. Описание типов ландшафтов выполнено на основе классификации, разработанной [19] до уровня урочищ. В основу классификационной схемы приняты следующие элементы ландшафта: тип растительности, тип рельефа, литологический состав горных пород, глубина сезонного протаивания горных пород, средняя годовая температура горных пород на подошве деятельного слоя [2].

Маршрутное обследование долины руч. Улахан-Тарын в области существующей и ранее предполагаемой разгрузки подземных вод проведено в сентябре 2015 г. Ландшафтные исследования местности включали описание растительности и особенностей рельефа. Для изучения литологического состава горных пород в пределах деятельного слоя на типичных ландшафтах заданы шурфы глубиной до 3.5 м, измерена мощность слоя сезонного оттаивания пород. Данные о средней годовой температуре горных пород заимствованы из литературных источников [3] и частично получены авторским коллективом в ходе многолетних геотермических наблюдений. Измерения выполнялись с помощью 4-канальных логгеров HOBO U12-008, датчики которых установлены на глубинах 0; 0.5; 1.2; 3.5; 8 и 14 м. Частота измерений – каждые 3 ч.

Для оценки мерзлотно-гидрогеологических условий территории выполнены электроразведочные работы методом электротомографии по двум профилям в мае 2016 г. При зондированиях использовалась аппаратура “Скала-64”, разработанная в ИНГГ СО РАН. Длина установки зондирования составляла 315 м с шагом между электродами 5 м. Последовательность подключения электродов соответствовала симметричной установке Шлюмберже и дипольно-осевой установке. Глубинность зондирований составила 70 м. На профиле 2 (см. рис. 4) применялась дипольно-осевая установка зондирования, что дало возможность изучить разрез до глубины 110 м.

Дешифрирование космоснимков

Термосуффозионные процессы проявляются вблизи области разгрузки межмерзлотных вод, приуроченной к нижнему течению руч. Улахан-Тарын (рис. 3). В присклоновой части бестяхской террасы в настоящее время имеются пять сконцентрированных групп родников межмерзлотных подземных вод [6, 8]. Также напротив группы E расположен источник, именуемый “Наледный” [1]. На поверхности террасы и ее склоне возникают и активно развиваются суффозионные воронки и провалы, увеличивающие из года в год размеры оврагов (цирков).

Кроме формирующихся цирков в присклоновой части бестяхской террасы расположено огромное количество балок. Особенно их много на отрезке протяженностью около 2.5 км между группами родников B и E как на правом, так и на

Рис. 3. Фрагмент космоснимка долины руч. Улахан-Тарын по данным Яндекс Карты: 1 – развивающиеся овраги (термоцирки) и название группы источников подземных вод; 2 – балки.

левом бортах долины Улахан-Тарына. Балки представляют собой врезы в склон террасы шириной от первых десятков метров до 235 м, длиной до 270 м, полого наклонные. Некоторые из них имеют циркообразные очертания, наподобие мест разгрузки действующих источников (цирки A, B, C и D). На космических снимках балки, покрытые густой древесной и кустарниковой растительностью, выделяются более яркими тонами, по сравнению с сероватыми оттенками соснового редколесья поверхности бестяхской террасы и коричневыми и светло-коричневыми цветами безлесных участков конусов выноса, поймы руч. Улахан-Тарын и зон разгрузки подземных вод. От некоторых балок вглубь террасы прослеживаются понижения в рельефе, как правило, линейно вытянутые. Они, как и балки, маркируются яркими зелеными оттенками древесной и кустарниковой растительности.

Описание ландшафтов

В ходе маршрутных исследований было выполнено описание ландшафтов в 17 точках (табл. 1). Выбор точек обусловлен стремлением охвата наибольшего разнообразия типов урочищ и выявления различных стадий сукцессии растительности на участках, подвергшихся термосуффозии. Поверхность исследуемой территории слаборасчлененная, обращенная в сторону р. Лена. Согласно классификации ландшафтов [19], эта территория относится к песчано-грядовому типу местности. В его пределах распространены преимущественно редкостойные лишайниково-толокнянковые сосняки, березово-лиственничники, луговые и заболоченные западины. Последние три типа растительных ассоциаций приурочены к пониженным участкам рельефа.

Долина руч. Улахан-Тарын относится к мелкодолинному типу местности. В пределах этого таксона выделены преимущественно ельники зеленомошные, тальники березовые разнотравные, осоковые луга, незакрепленные конусы выноса.

Склоновый тип местности приурочен к склону бестяхской террасы, обнажающемуся в долине руч. Улахан-Тарын. Высота эрозионного вреза на участке от федеральной дороги к устью ручья увеличивается от 16 до 30 м. Поверхность склона террасы над выходами подземных вод, как правило, представлена оголенными песками.

Геофизические исследования

В конце мая 2016 г. для изучения геолого-геокриологических условий в районе точек 14 и 16

Рис. 4. Схема расположения геофизических профилей в долине руч. Улахан-Тарын.

(см. табл. 1) были выполнены исследования методом электротомографии по двум профилям (рис. 4).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Профиль 1 длиной 315 м располагался в изголовье балки и протягивался перпендикулярно ее простиранию. Профиль 2 длиной 475 м был размечен вдоль тальвега балки и достигал поймы руч. Улахан-Тарын. Для интерпретации поля кажущихся электрических сопротивлений в качестве эталона использован разрез скважины 1–16 (рис. 5), которую пересекал профиль 1. Скважина 1–16 глубиной 25 м пробурена в апреле 2016 г. Под слоем многолетнемерзлых мелко- и среднезернистых песков мощностью 16 м были вскрыты обводненные породы (плывун) до забоя скважины. В разрезе песков с глубины 9 м отмечены прослои супеси толщиной 1–2 мм, а с глубины 13 м – до 0.5 м.

Согласно [5, 13], пороговое значение удельного электрического сопротивления (УЭС), разделяющее мерзлые и талые пески бестяхской террасы р. Лена, соответствует 1000 Ом м. Соответственно более высокие его величины отражают мерзлое состояние пород, ниже – талое. Области пониженного (200–600 Ом м) и низкого (35–150 Ом м) УЭС интерпретируются как талые пески с разной степенью влажности и количеством супесчаных прослоев.

Распределение УЭС на рис. 5 отражает как литологический состав пород, так и геокриологические условия участка. Присутствие в песке прослоев супеси с глубины 9 м уменьшает УЭС с 3500–5500 до 2000 Ом м. С глубины 16 м, где вскрыты водонасыщенные пески, значение УЭС пород понижается с высоким градиентом с 1400 до 70–120 Ом м.

Разрез УЭС пород по профилю 1 отражает мерзлотно-гидрогеологическое строение в пределах балки, в которой прекращена разгрузка подземных вод (рис. 6). По распределению УЭС хорошо заметно, что нижняя граница ММП имеет сложную конфигурацию. В основании балки (ин-

Таблица 1. Описание ландшафтов в долине руч. Улахан-Тарын

№ точки	Координаты		Описание ландшафта
	Северная широта	Восточная долгота	
1	61°33′02.1″	129°35′30.4″	Песчаная гряда. Вырубка, произрастают сосняк и толокнянково-лишайниковые
2	61°33′17.4″	129°34′46.9″	Межгрядовое понижение. Березово-елово-лиственничник разнотравно-арктоусовый зеленомошный
3	61°33′17.1″	129°35′48.8″	Локальное понижение, болото. Кочкарник арктоусово-осоковый зеленомошный. Гл. СТС 1.20 м*
4	61°33′10.0″	129°35′47.7″	Пойма руч. Улахан-Тарын. Произрастает елово-березовый ивняк осоковый зеленомошный, редкий кочкарник. Гл. СТС 0.84–1.20 м
5	61°33′13.5″	129°35′37.2″	Пойма руч. Улахан-Тарын. Произрастает ельник осоково-ивовый зеленомошный. Гл. СТС 1.30–1.40 м
6	61°34′18.2″	129°33′52.8″	Пойма руч. Улахан-Тарын, старый конус выноса напротив цирка В. Произрастает елово-березняк разнотравный зеленомошный. Гл. СТС 2.00 м
7	61°34′13.7″	129°33′47.0″	Пойма руч. Улахан-Тарын, напротив цирка С. Произрастает ерничник осоковый зеленомошный, кочкарник. Гл. СТС 1.10–1.34 м
8	61°33′07.0″	129°35′51.1″	Пойма руч. Улахан-Тарын, песчаный конус выноса напротив цирка Е. Произрастает редкий ивняк осоковый (высотой до 0.5 м). Гл. СТС >2.46 м. Подземные воды вскрыты с 0.96 м. В русле ручья, вытекающего из цирка Е гл. СТС сокращается до 0.80–1.25 м
9	61°33′26.2″	129°36′17.0″	Заболоченное понижение, покрытое кочкарником. Произрастают арктоусо-осоковые луга зеленомошные. Гл. СТС 0.45–0.60 м
10	61°33′25.6″	129°36′16.8″	Склон озерной котловины. Произрастает сосново-березово лиственничник багульниково-брусничниковый зеленомошный. Гл. СТС 1.30 м. С 0.55 м вскрыт водоносный слой
11	61°33′13.4″	129°35′54.6″	Балка. Произрастает березово-сосново-лиственничник багульниково-голубичный зеленомошный. Гл. СТС 1.30 м
12	61°33′14.4″	129°35′52.6″	Балка, шириной 30 м. Произрастает лиственнично-ельник осоково-голубичниковый зеленомошный с фрагментами кочкарника. Гл. СТС 0.50 м
13	61°33′45.2″	129° 5′13.3″	Песчаная гряда близ склона руч. Улахан-Тарын. Отмечены следы пожаров. Сосняк толокнянковый
14	61°33′52.1″	129°34′30.7″	Балка. Произрастает березово-елово-лиственничник арктоусово-голубичный зеленомошный. Гл. СТС 0.55 м
15	61°33′22.9″	129°35′25.5″	Балка шириной 10–15 м. Произрастает березово-лиственничник толокнянковый. Гл. СТС 1.65 м
16	61°33′53.0″	129°34′45.1″	Песчаная гряда. Сосняки толокнянково-лишайниковые. Гл. СТС 3.55 м
17	61°33′23.0″	129°35′39.0″	Межгрядовое понижение. Сосново-березово-елово-лиственничник разнотравный лишайниковый зеленомошный. Гл. СТС 0.80–1.00 м

* Гл. СТС – глубина сезонноталого слоя

тервал профиля 120–180 м) мощность мерзлой толщи составляет 20 м. Мощность же межмерзлотного водоносного талика оценивается в 65–70 м. С глубины 95 м в разрезе проявляются породы с высокоомным сопротивлением, интерпретируемые как породы коренного цоколя [5, 13]. Потен-

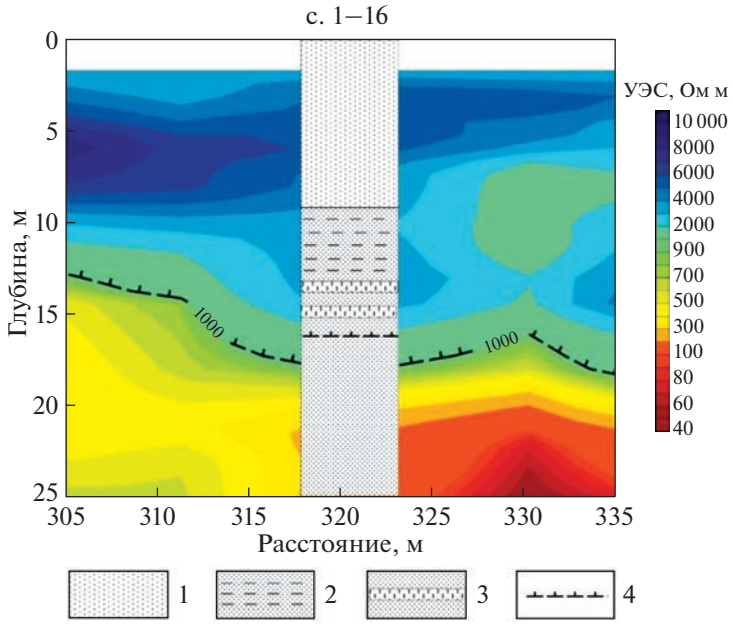

Рис. 5. Геоэлектрический разрез и геологический разрез по скважине 1–16: 1 – песок; 2 – песок с прослоями супеси мощностью 1–2 мм; 3 – песок с прослоями супеси мощностью до 0.5 м; 4 – подошва ММП.

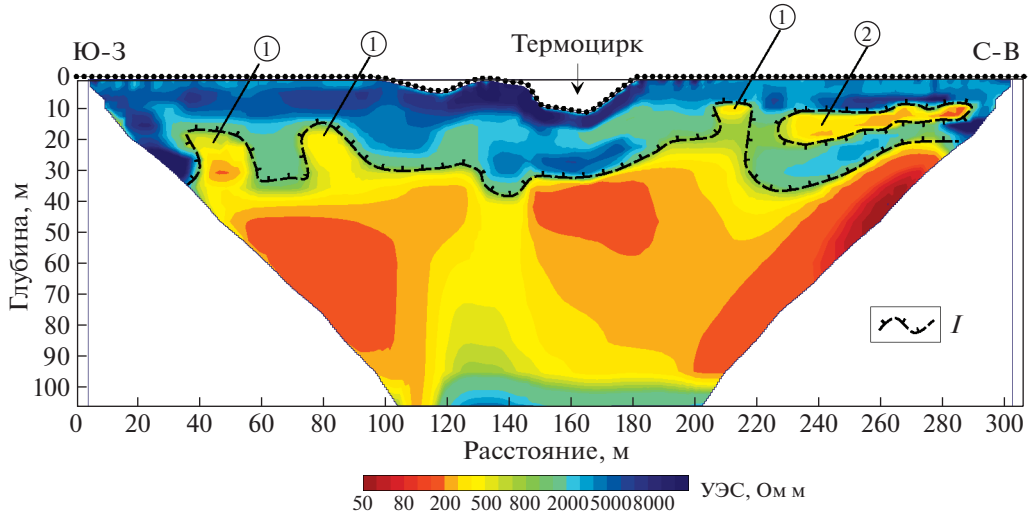

Рис. 6. Геоэлектрический разрез по профилю 1. 1 – потенциальные участки образования термосуффозионных воронок; 2 – внутримерзлотный талик. *I* – подошва мерзлых пород.

циальные участки развития термосуффозионных воронок на профиле 1 отмечены по характерным аномалиям УЭС в интервалах профиля 35–55, 75–90 и 210–220 м, в пределах которых мощность мерзлой толщи над межмерзлотным таликом сокращается до 8–16 м. В интервале профиля 230–300 м на глубине 10–20 м аномалия пониженного УЭС нами интерпретируется как внутримерзлотный талик сложной конфигурации.

Строение мерзлотно-гидрогеологического разреза *вдоль* тальвега балки отражено на геоэлектрическом разрезе по профилю 2 (рис. 7).

На разрезе по границе пород низкого (менее 600 Ом·м) и высокого УЭС интерпретируется современная граница ММП, располагающаяся на глубине в среднем 20 м. Стоит отметить, что пойменная часть разреза (значения УЭС >3500 Ом м) промерзла на всю глубину зондирования (до 80 м), а межмерзлотный водоносный талик прак-

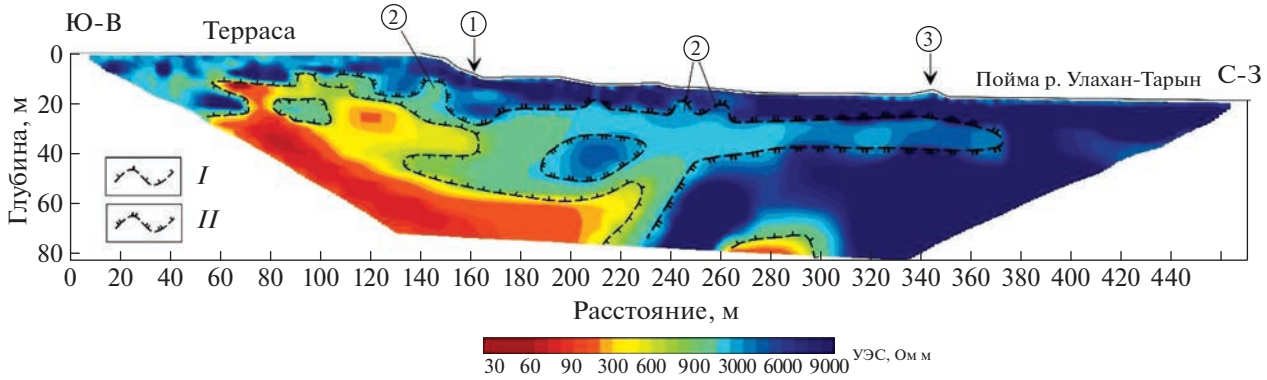

Рис. 7. Геоэлектрический разрез по профилю 2. 1 – термоцирк; 2 – предполагаемая промороженная зона разгрузки подземных вод; 3 – останец. *I* – современная подошва ММП по данным электротомографии; *II* – предполагаемая граница многолетней мерзлоты в период активной разгрузки подземных вод.

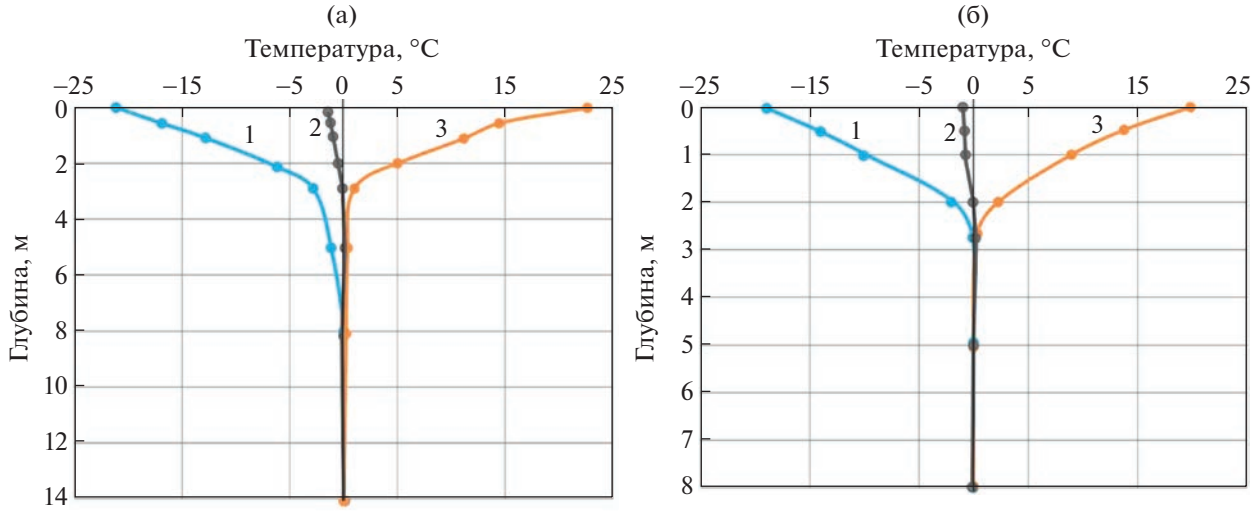

Рис. 8. Огибающие температурные кривые по данным скважины 2–10 за 2010–2013 гг. (а) и за 2014–2020 гг. (б), расположенной в районе цирка Е источника Улахан-Тарын. Температура: 1 – минимальная, 2 – средняя, 3 – максимальная.

тически субвертикально (интервалы профиля 210–230 м на рис. 7) выклинивается в направлении к пойме руч. Улахан-Тарын. Однако распределение УЭС свидетельствует, что в период существования разгрузки подземных вод на месте исследуемой балки конфигурация границы мерзлых пород была иной. Так, в интервале профиля 140–150 м на глубине 7–10 м по аномалии пониженного УЭС (до 1800 на фоне 4500 Ом м) выделяется характерная область, интерпретируемая как водовыводящая зона. Узкая вытянутая область пониженного УЭС внутри мерзлой толщи прослеживается почти до современной поймы р. Улахан-Тарын. Мы считаем, что таким образом выделяется промороженный в настоящее время канал фильтрации, по которому происходил транзит подземных вод к зонам разгрузки в недалеком прошлом.

В районе участка разгрузки подземных вод в цирке Е (см. рис. 3), обнаруженного в 2009 г., с этого же года на песчано-грядовом типе местности ведутся непрерывные термометрические наблюдения в слое годовых теплооборотов (12 м). По данным скважины 2–10 (см. рис. 1) глубина сезонного протаивания горных пород составляет в среднем 3.5 м, а температура на подошве нулевых годовых амплитуд равна –0.2°С (рис. 8). В 2014 г. по результатам замеров температуры удалось зафиксировать начало формирования субаэрального надмерзлотного талика [4]. С 2014 по 2020 г. глубина залегания верхней границы ММП сместилась с 3.5 до 6.0 м (см. рис. 8). Основной причиной формирования талика, по нашему мнению, явились аномально большое количество и интенсивный режим выпадения жидких атмосферных осадков в начале лета [4]. В резуль-

тате этого были значительно повышены влагозапасы в деятельном слое, что привело к сохранению зимой водоносного “буферного слоя”, препятствовавшего промерзанию горных пород.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Внешние факторы, способствующие затуханию термосуффозии

В результате многолетних исследований источника подземных вод Улахан-Тарын установлено, что область питания подземных вод межмерзлотного водоносного горизонта (ММВГ) приурочена частично к аласному и межаласному типам местности и преимущественно к песчано-грядовому. В первых двух типах местности гидравлическая связь поверхностных вод с ММВГ осуществляется через сеть водопоглощающих подозерных таликов [1, 2, 8, 21, 22].

В песчано-грядовом типе местности инфильтрационное питание ММВГ происходит как через субаквальные (подозерные), так и субаэральные надмерзлотные талики. Здесь же расположена и область транзита подземных вод. В ее пределах межмерзлотный водоносный талик неоднократно был вскрыт разведочными скважинами на глубинах 24–36 м под толщей ММП. Мощность талика не выдержана и изменяется от 8 до 25 и более м. Наличие перекрывающего и подстилающего криогенного водоупора определяет напорный режим фильтрации межмерзлотных вод, уровень которых устанавливается в скважинах на 24–34 м выше кровли водоносного горизонта. Вблизи зоны разгрузки подземных вод глубина залегания ММВГ составляет 16–27 м, мощность его увеличивается до 32–56 м, а напор межмерзлотных вод не превышает 7–12 м.

Зимой практически сухие пески сезонноталого слоя (весовая влажность не более 5%) в песчано-грядовом типе местности обеспечивают низкую теплопроводность мерзлых горных пород, а в теплый период года быстрая инфильтрация талых снеговых вод и атмосферных осадков, сопровождающаяся увеличением теплопроводности песков, способствует глубокому их протаиванию – до 4–5 м [2, 20]. ММВГ – по существу крупный источник тепла, также вносит значительный вклад в формирование температурного режима пород. Об этом свидетельствуют высокие значения среднегодовой температуры ММП (до –0.2°С), перекрывающих ММВГ, и сокращение мощности слоя годовых теплооборотов вплоть до совпадения его с мощностью слоя сезонного протаивания пород [17].

Область дренажа ММВГ приурочена к мелкодолинному типу местности. Разгрузка подземных вод происходит в циркообразных понижениях (оврагах), врезанных в борт бестяхской террасы, осложняющих строение долины руч. Улахан-Тарын. В летний период – это нисходящие и восходящие струи и пластовые выходы подземных вод, зимой – восходящие родники, как правило, скрытые наледью. Разгрузка подземных вод сопровождается выносом песка, который откладывается в долине руч. Улахан-Тарын.

Наличие в долине руч. Улахан-Тарын многочисленных оврагов и балок, врезанных в бестяхскую террасу р. Лена (см. рис. 4), а также молодых и относительно древних конусов выноса свидетельствует о стадийности процесса термосуффозии. Периоды его активации следуют за периодами избыточного увлажнения территории, когда на протяжении ряда лет наблюдается сочетание превышения суммы летних атмосферных осадков и влагозапаса в снежном покрове относительно средних многолетних значений [6, 11]. Такие гидроклиматические события, сопровождающиеся повышением уровня воды в озерах, увеличением водообильности таликов и ростом гидравлических градиентов фильтрационного подземного потока, выступают в роли “пускового механизма” для термосуффозионных процессов.

Термосуффозионное разуплотнение горных пород, приводящее к обрушению кровли ММВГ и формированию провалов на дневной поверхности, значительно трансформирует облик рельефа. Появление и увеличение со временем диаметра и глубины термосуффозионных воронок, их объединение, приводят к развитию оврагов, в пределах которых температурно-влажностный режим горных пород значительно отличается от сопредельной территории. Об этом свидетельствуют описанные нами ландшафты на ключевых участках, прямо и косвенно указывающие на изменение мерзлотно-гидрогеологической обстановки.

Образование трещин в песчаном массиве, нарушение растительного покрова, появление локальных депрессий поверхности земли способствуют повышению средней годовой температуры горных пород. К примеру, по данным скважины 2–10, расположенной вдали от суффозионных воронок в пределах песчано-грядового типа местности, глубина СТС достигает 3.5 м, а годовых теплооборотов – 12 м, при средней годовой температуре на подошве последнего –0.2°С. По результатам термометрии в скважине 1–09, расположенной в таком же типе местности, но в 3–5 м от активного оврага в цирке Е, увеличивающегося за счет объединения суффозионных воронок, глубина СТС совпадает с глубиной годовых теплооборотов и соответствует 3.5 м при средней годовой температуре пород на подошве этих слоев ~0°С.

Изменения рельефа приводят к перераспределению влаги в деятельном слое, а также условиям теплообмена горных пород с атмосферой.

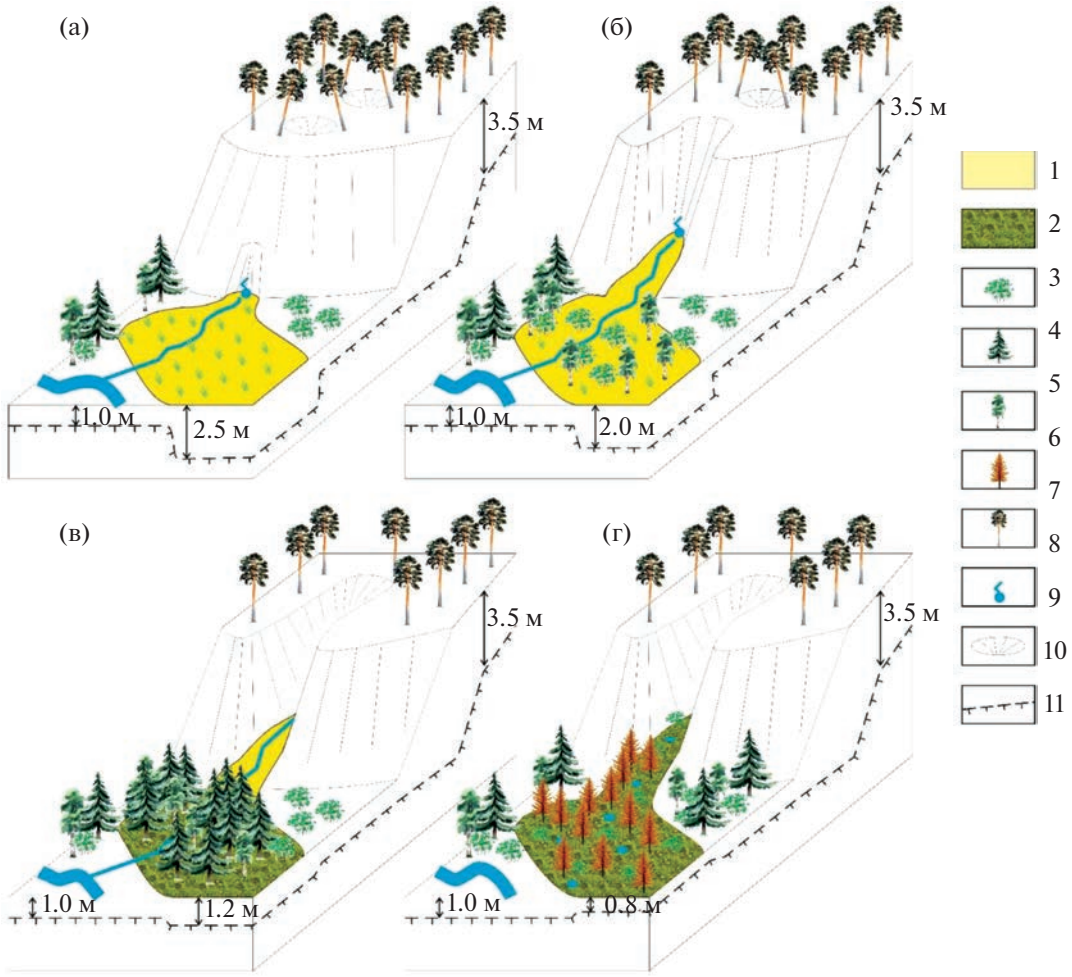

Рис. 9. Схема сукцессий растительности на участках развития термосуффозионных процессов в районе руч. Улахан-Тарын. 1 – песчаный конус выноса; 2 – моховой покров; 3 – луговая растительность; 4 – кустарники; 5 – береза; 6 – ель; 7 – лиственница; 8 – сосна; 9 – источник подземных вод; 10 – термосуффозионная воронка; 11 – граница ММП.

В первую очередь на эти изменения ландшафта реагирует состав растительных сообществ. Сукцессионные ряды растительности являются объективными показателями трансформации геокриологических условий. Результаты мерзлотно-ландшафтных исследований, полученные на нарушенных площадях в Центральной Якутии рассмотрены в работах [12, 18, 23]. Например, на вырубках и пирогенных территориях на начальной стадии восстановления растительности оголенная поверхность горных пород постепенно зарастает травянистой, травянисто-кустарниковой растительностью. Затем на увлажненных почвах появляются береза, тальник. Длительность первых двух стадий составляет около 20 лет. Березово-тальниковая группировка зрелого возраста вытесняется елью и лиственницей. На этой стадии развития образуется моховой теплоизолирующий покров, способствующий уменьшению мощности деятельного слоя и понижению температуры горных пород на его подошве. На завершающей фазе (50 лет) сукцессии растительность представлена лиственничником с тальниковым подлеском.

Закономерность восстановления мерзлотных ландшафтов мы попытались проследить в долине руч. Улахан-Тарын, и тем самым оценить внешние факторы затухания термосуффозионных процессов. После появления очага разгрузки межмерзлотных подземных вод у подножия склона бестяхской террасы р. Лена в долине ручья начинаются активный суффозионный вынос песчаных частиц из водовмещающей толщи и аккумуляция их в виде конуса выноса (рис. 9а).

Подобное явление наблюдалось авторами при обнаружении родника в цирке Е в 2009 г. Молодые песчаные конусы выноса лишены растительности. После прекращения осадконакопления в течение нескольких лет на них появляется луговая растительность. Глубина СТС на таких участках достигает 2.5 м. На смежных участках поймы руч. Улахан-Тарын деятельный слой не превышает 1 м.

Рис. 10. Общий вид пещеры, обнаруженной в цирке Е источника Улахан-Тарын, (а) и лед в ее стенке (б), 20.09.2011 г. (фото Л.А. Гагарина).

Появление растительного покрова на конусах выноса и в приустьевой части развивающегося оврага изменяет теплообмен между атмосферой и горными породами, как правило, в сторону охлаждения последних. Как результат, сокращается мощность деятельного слоя. Поверхность таких участков начинает покрываться влаголюбивой растительностью: разнотравьем, ивовыми и березовыми кустарниками, а мощность СТС сокращается до 2.0 м (рис. 9б). В строении более древних конусов выноса, помимо песков, участвуют и продукты их выветривания – алевриты. Такие объекты покрыты елово-ивово-березовыми осоковыми ассоциациями растений. Глубина СТС в пределах древних конусов выноса сокращается до 0.8–2.0 м (рис. 9б). На устье старых балок растут березово-ельники зеленомошные. Мощность СТС здесь 1.2–1.5 м (рис. 9в). На последней стадии сукцессионного ряда березняки и ельники замещаются лиственничниками зеленомошными с кочкарником. Подобные растительные ассоциации характерны для днища долины руч. Улахан-Тарын (мелкодолинный тип местности). Глубина СТС здесь составляет 0.5–0.8 м (рис. 9г).

Таким образом, изменения ландшафтных и мерзлотно-гидрогеологических условий в долине руч. Улахан-Тарын затрудняют условия разгрузки подземных вод вплоть до полного промерзания водовыводящей зоны и являются одной из причин затухания термосуффозионных процессов на бестяхской террасе р. Лены.

Внутренние факторы, способствующие затуханию термосуффозии

В результате разуплотнения горных пород при термосуффозионных процессах в склоне бестяхской террасы р. Лена образуются полости (пещеры) глубиной в несколько метров при ширине свода до 5 м [5, 6, 13]. Очаги разгрузки подземных вод могут смещаться от дневной поверхности у подножия склона террасы вглубь упомянутых пещер [1, 13]. Подобные явления авторы неоднократно наблюдали в полостях, расположенных в склонах цирков В и Е. Родник в пещере также, как и на других участках разгрузки подземных вод в долине руч. Улахан-Тарын, представлял собой грифон (псевдовулкан), из которого водным потоком выносились песчаные частицы. Ручей, питаемый этим родником, растекался по всей площади пещеры и вытекал из нее (рис. 10). Днище пещер было сложено мерзлым песком, оттаявшим сверху на глубину первых сантиметров при взаимодействии с водой. Боковые стенки и кровля полостей находились в мерзлом состоянии. По форме пустоты напоминали трубы [9, 22]. В цирке Е в одной из таких пещер в задней ее стенке было обнаружено ледяное тело (см. рис. 10) [6]. По его периметру присутствовали отдельные включения льда в виде корок, на общем фоне массивной криогенной текстуры. Появление в стенках пещер монолитных ледяных включений и корковой криогенной текстуры в мерзлом песчаном массиве можно объяснить следующим образом. При расширении полостей до критических размеров, когда свод не выдерживает вышележащей нагрузки, происходит обрушение мерзлой кровли ММВГ. При провалообразовании нарушаются гидродинамические условия (направление и скорость потока, его напор). Заполнивший полость мерзлый песчаный массив выступает в качестве барража, препятствующего стоку родниковых вод. Во время обрушения свода в нем образуются серпообразной формы локальные пустоты и трещины, которые под напором межмерзлотных вод заполняются и замерзают [6, 14].

Ухудшение условий разгрузки приводит к локализации каналов стока и уменьшению расхода ручья на выходе из пещеры. Подобные процессы, особенно в холодные и малоснежные зимы, способствуют перемерзанию зоны разгрузки подземных вод и, как следствие, изолированию области выноса песчаного материала и затуханию термосуффозии. Усугубляет подобный ход событий образование наледи над родником и в днище цирка. Она выступает в роли дополнительного барьера, препятствующего поверхностному стоку. Стоит отметить, что это лишь предположения возможных причин затухания процесса термосуффозии.

В качестве косвенного доказательства того, что затухание термосуффозии связано с изменчивостью гидродинамических и геотермических условий в ММВГ и его кровле служат интерпретируемые мерзлотно-гидрогеологические разрезы, построенные на основе геоэлектрических полей и заверенные данными буровых работ. Глубина залегания кровли ММВГ в районе старой балки не выдержана по разрезу и изменяется от 10 до 30 м (см. рис. 5). Это свидетельствует об изменчивости мерзлотно-гидрогеологических условий в относительно недавнем прошлом [6, 14]. Выделенные на разрезе участки с наиболее тонким слоем ММП (см. рис. 6) характеризуют зоны потенциального развития термосуффозионного разуплотнения горных пород [5, 13]. Локализованная аналогичная область на участке профиля 230–300 м, вероятно, свидетельствует о современном перемерзании ранее сконцентрированных зон подземного стока. По геоэлектрическому разрезу, заданному вдоль оси балки (см. рис. 7), также напрашивается вывод о современном перемерзании некогда существовавших областей подповерхностного стока. По аналогии с этапностью развития термосуффозии [6], по мере выноса межмерзлотными подземными водами песчаных частиц, сопровождающегося образованием и развитием провальных форм рельефа, область разгрузки смещается в изголовье оврага. Об этом свидетельствует зона постепенно уменьшающихся значений УЭС на профиле 2 (см. рис. 7) на пикетах от 370 до 160 м на глубине от 20 до 30 м. Мы предполагаем, что на этом участке в настоящее время происходит промерзание ранее существовавшего межмерзлотного водоносного талика.

На увеличение суровости мерзлотных условий, по сравнению с окружающей территорией, указывают и ландшафтные признаки (лиственничник зеленомошный с кочкарником). Предполагается, что в период существования родника в этом месте, когда шло развитие термоцирка (оврага), межмерзлотный водоносный талик распространялся в направлении поймы до пикета 240–370 м профиля (см. рис. 7). Дополнительным подтверждением этому является песчаный холм-останец на дне балки, расположенный в нескольких десятках метров от поймы руч. Улахан-Тарын (высота до 2 м, диаметр ~10 м). На вершине холма и его склонах произрастают сосновые деревья высотой до 12 м. Это косвенно свидетельствует о более глубоком сезонном его протаивании в отличие от окружающей территории, где произрастают редкие лиственницы, а поверхность сплошь покрыта кочкарником. Подобного рода останцы встречаются в зонах современной разгрузки подземных вод в цирках. По генезису они являются оползнями, которые формируются на склоне бестяхской террасы р. Лена из-за суффозионного разуплотнения горных пород.

Таким образом, прекращение разгрузки подземных вод в результате обрушения кровли ММВГ в термоцирке приводит к затруднению фильтрации подземных вод, уменьшению дебита родника и способствует промерзанию водовыводящей зоны пород в тальвеге оврага. Изолирование области выноса песчаного материала мерзлыми породами приводит к затуханию термосуффозионных процессов. При этом не исключается образование новых выходов подземных вод на удалении от промерзшей зоны.

ВЫВОДЫ

Разуплотнение горных пород в результате термосуффозии значительно изменяет рельеф земной поверхности и, как следствие, трансформирует облик ландшафта. Образование трещин в песчаном массиве, нарушение растительного покрова, появление локальных депрессий поверхности способствуют увеличению глубины сезонного протаивания, повышению среднегодовой температуры горных пород, увеличению влагозапасов в деятельном слое. Значительная часть соснового редколесья, из-за просадок рельефа, погибает. Увеличение диаметра и глубины термосуффозионных воронок приводит к развитию оврага, в пределах которого температурно-влажностный режим горных пород существенно отличается от сопредельной территории. Разгрузка подземных вод с постоянной температурой, в течение года близкой к 0°С, на дне оврага создает избыточное увлажнение и низкую амплитуду колебаний температуры горных пород деятельного слоя. В ходе эволюции оврага, при прекращении осадконакопления, начинается сукцессия растительности. Оголенная поверхность горных пород сначала зарастает травянистой, травянисто-кустарниковой растительностью. Постепенно на увлажненных почвах появляются березняки, ивняки. При достижении березово-тальниковой группировки зрелого возраста она вытесняется ельником и лиственничником. На этой стадии развития ландшафта образуется моховой покров, способствующий уменьшению мощности деятельного слоя и понижению температуры горных пород на

его подошве. Завершающая фаза сукцессии характеризуется увеличением количества лиственничного леса с тальниковым подлеском. В целом такое развитие ландшафта сопровождается постепенным изменением геокриологической обстановки вплоть до аградации мерзлоты в водовыводящей зоне.

Тем не менее лишь внешнего фактора может быть недостаточно для промерзания области разгрузки подземных вод. Примером тому служат современные крупные группы источников в термосуффозионных цирках. Благоприятные условия для промерзания водовыводящей зоны создаются после формирования подземной полости и обрушения ее мерзлой кровли. Перекрытие путей подземного стока способствует восстановлению мерзлоты внутри массива горных пород и изолированию зоны выноса пород, разрушенных термосуффозией [13]. В свою очередь, совокупность внутренних (затруднение водообмена) и внешних (сукцессии растительных сообществ) факторов является причиной затухания термосуффозионных процессов на бестяхской террасе р. Лены.

Полевые геотермические, геофизические и ландшафтные исследования выполнены в рамках базового проекта НИОКТР №122012400106-7. Дешифрирование аэрофотоснимков, изучение сукцессий и комплексный анализ результатов полевых исследований выполнены при поддержке гранта РНФ и Якутского научного фонда № 22-17-20040. Интерпретация геофизических данных выполнена при поддержке проекта Программы фундаментальных научных исследований FWZZ- 2022-0024.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анисимова Н.П.* Формирование химического состава подземных вод таликов (на примере Центральной Якутии). М.: Наука, 1971. 196 с.
2. *Бойцов А.В.* Геокриология и подземные воды криолитозоны. Тюмень: ТюмГНГУ, 2011. 178 с.
3. *Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрябин П.Н.* Температурный режим грунтов мерзлотных ландшафтов Центральной Якутии. Якутск: ИМ СО РАН, 2002. 218 с.
4. *Гагарин Л.А.* Оценка современных условий формирования субаэральных таликов в Центральной Якутии // Матер. Всерос. сов. по подземным водам Востока России. Якутск: ИМЗ СО РАН, 2015. С. 76–80.
5. *Гагарин Л.А., Бажин К.П., Оленченко В.В., Огонеров В.В., Ву Цинбай*. Выявление участков потенциального термосуффозионного разуплотнения грунтов вдоль федеральной автодороги А-360 “Лена” в Центральной Якутии // Криосфера Земли. 2019. № 3 (23). С. 61–68.
6. *Гагарин Л.А., Семерня А.А., Лебедева Л.С.* Оценка термосуффозионных процессов в Центральной Якутии на примере участка Улахан-Тарын // Геоэкология. 2016. № 3. С. 252–262.
7. *Галанин А.А., Павлова М.Р., Шапошников Г.И., Лыткин В.М.* Тукуланы: песчаные пустыни Якутии // Природа. 2016. № 11. С. 44–55.
8. *Ефимов А.И.* Незамерзающий пресный источник Улахан-Тарын в Центральной Якутии // Исследование вечной мерзлоты в Якутской республике. 1952. № 3. С. 60–105.
9. *Иванов М.С.* Криогенное строение четвертичных отложений Лено-Алданской впадины. Новосибирск: Наука, 1984. 126 с.
10. *Камалетдинов В.А.* Рельеф цоколя и строение четвертичного покрова Лено-Амгинского междуречья // Геология Кайнозоя Якутии. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1982. С. 94–103.
11. *Колесников А.Б.* Влияние современных параметров климата на условия инфильтрационного питания водоносных таликов Центральной Якутии // Матер. Всерос. сов. по подземным водам Востока России. Якутск: ИМЗ СО РАН, 2015. С. 114–117.
12. *Лыткина Л.П., Миронова С.И.* Послепожарная сукцессия в лесах криолитозоны (на примере Центральной Якутии) // Экология. 2009. № 3. С. 168–173.
13. *Оленченко В.В., Гагарин Л.А., Христофоров И.И., Колесников А.Б., Ефремов В.С.* Строение участка развития термосуффозионных процессов в пределах Бестяхской террасы реки Лены по геофизическим данным // Криосфера Земли. 2017. № 5 (21). С. 16–26.
14. *Павлова Н.А., Колесников А.Б., Ефремов В.С., Шепелев В.В.* Химический состав подземных вод межмерзлотных таликов в Центральной Якутии // Водные ресурсы. 2016. № 2 (43). С. 216–227.
15. *Правкин С.А., Большиянов Д.Ю., Поморцев О.А., Савельева Л.А. и др.* Рельеф, строение и возраст четвертичных отложений долины р. Лены в Якутской излучине // Вестник СПбГУ. 2018. № 2 (63). С. 209–229.
16. *Румянцев Е.А.* Наледный процесс и явление зимней напорной суффозии // Тр. Хабаровского ин-та инженеров ж/д транспорта. 1966. (21). С. 4–15.
17. *Семерня А.А., Гагарин Л.А., Бажин К.И.* Гидрогеологические особенности участка распространения межмерзлотного водоносного комплекса в районе источника Ерюю (Центральная Якутия) // Криосфера Земли. 2018. № 2 (XXII). С. 29–38.
18. *Тимофеев П.А., Исаев А.П., Щербаков И.П.* Леса среднетаежной подзоны Якутии. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1994. 140 с.
19. *Федоров А.Н.* Мерзлотные ландшафты Якутии: методика выделения и вопросы картографирования. Якутск: ИМЗ СО РАН, 1991. 140 с.
20. *Шендер Н.И., Бойцов А.В., Тетельбаум А.С.* Формирование таликов и высокотемпературных мерзлых пород в условиях центральной Якутии // Матер. первой конференции геокриологов России. М.: Изд-во МГУ, 1996. Кн. 1. Ч. 3. С. 525–537.
21. *Шепелев В.В.* Оценка эрозионно-суффозионной деятельности источников Центральной Якутии // Известия вузов: Геология и разведка. 1972. (9). С. 88–92.

22. *Шепелев В.В., Бойцов А.В., Оберман Н.Г., Петченко М.Ф. и др.* Мониторинг подземных вод криолитозоны. Якутск: ИМЗ СО РАН, 2002. 172 с.

23. *Шестакова А.А.* Картографирование мерзлотных ландшафтов с учетом сукцессий растительности (на примере Лено-Алданского междуречья) // Сергеевские чтения. Роль инженерной геологии и изысканий на предпроектных этапах строительного освоения территорий. М.: РУДН, 2012. С. 153–158.

24. *Czudek T., Demek J.* Thermokarst in Siberia and Its Influence on the Development of Lowland Relief // Quaternary Research. 1970. № 1 (1). С. 103–120.

25. *Embleton C., Thornes J.B.* Process in geomorphology. New York: Wiley, 1979. 436 с.

CAUSES OF THERMAL SUFFOSION ATTENUATION ON THE BESTYAKH TERRACE OF THE LENA RIVER, CENTRAL YAKUTIA

L. A. Gagarin[a,#], V. V. Olenchenko[b,##], and N. A. Pavlova[a]

[a] *Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Merzlotnaya ul., 36, Yakutsk, 677010 Russia*

[b] *Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, pr. akad. Koptyuga 3, Novosibirsk, 630090 Russia*

[#] *E-mail: gagarinla@gmail.com*

[##] *E-mail: olenchenkovv@yandex.ru*

This paper presents the results of thermal suffosion study in the Ulakhan-Taryn Creek valley, Central Yakutia, where intrapermafrost groundwater is discharged. Interpretation of satellite images and analysis of field data from landscape surveys, electrical resistivity tomography studies and ground temperature observations were used to determine the factors contributing to the attenuation of thermal suffosion in sandy deposits of the IV (Bestyakh) terrace of the Lena River. Successional stages of revegetation in the accumulation zones of sands washed off by subsurface flow were examined. Vegetation succession was found to modify geocryological conditions in the groundwater discharge area, sometimes leading to its complete freezing. Conditions favorable both for permafrost aggradation and degradation may develop, depending on the landscape type. Ground temperature data indicate that the active layer thickness in sands at a thermal suffosion site covered by sparse pine forest is 3.5 m, while the mean annual permafrost temperature at the depth of zero annual amplitude is –0.2°C. In 2014, a subaerial talik began to form at this site, the bottom of which lowered from 3.5 m down to 6.0 m. At a larch site with tussocks, the active layer thickness is within 0.5–0.8 m and the mean annual permafrost temperature is about –2.0°C. An ERT survey provided information on the current permafrost and groundwater conditions, where groundwater discharge has ceased. A scenario is proposed describing the changes in the discharge area caused by permafrost disturbance above an aquifer. Formation of an underground cavity and collapse of the overlying permafrost layer resulting in characteristic depressions and sinkholes at the surface promote ground freezing in the discharge zone. Mechanical blocking the flow paths reduces the flow velocity promoting the restoration of permafrost and cutting off the area of soil removal by thermal suffosion. Further on, this attenuates the thermal suffosion. Its active phase can shift spatially due to thawing the pore ice in the permafrost in contact with the confined aquifer, widening soil voids and forming new flow pathways. Thus, attenuation of thermal suffosion on the Bestyakh Terrace of the Lena River results from the combination of internal (impeded flow) and external (vegetation succession) factors.

Keywords: *thermal suffosion*, *intrapermafrost groundwater*, *suprapermafrost groundwater*, *talik*, *permafrost*, *succession*, *electrical resistivity tomography*

REFERENCES

1. Anisimova, N.P. Formation of groundwater chemistry in taliks: case study of Central Yakutia. Moscow, Nauka Publ., 1971, 196 p. (in Russian)

2. Boitsov, A.V. Geocryology and underground water in permafrost. Tyumen, TyuGNGU Publ., 2011, 178 p. (in Russian)

3. Varlamov, S.P., Skachkov, Yu.B., Skryabin, P.N. Temperature regime of permafrost landscapes in Central Yakutia. Yakutsk, IM SO RAN Publ., 2002, 218 p. (in Russian)

4. Gagarin, L.A. Assessment of current settings of subaerial taliks in Central Yakutia. Proc. of the National conference on underground waters in Eastern Russia. Yakutsk, IM SO RAN Publ., 2015, pp. 76–80. (in Russian)

5. Gagarin, L., Bazhin, K., Olenchenko, V., Ogonerov, V., Wu, Q. Revealing potential thermo-suffosional soil loosening sites along A-360 Lena Federal Highway, Central Yakutia. *Kriosfera Zemli*, 2019, no. 3 (23), pp. 61–68. (in Russian)

6. Gagarin, L.A., Semernya, A.A., Lebedeva, L.S. The study of thermal suffosion processes in Central Yakutia: a case study of Ulakhan-Taryn site. *Geoekologia,* 2016, no. 3, pp. 252–262. (in Russian)

7. Galanin, A.A., Pavlova, M.R., Shaposhnikov, G.I., Lytkin, V.M. [Tukulans: sandy deserts of Yakutia. *Priroda,* 2016, no. 11, pp. 44–55. (in Russian)
8. Efimov, A.I. Nonfreezing freshwater spring Ulakhan-Taryn in Central Yakutia. *Permafrost Studies in the Republic of Yakutia*, 1952, no. 3, pp. 60–105. (in Russian)
9. Ivanov, M.S. Cryogenic structure of Quaternary deposits in Lena–Aldan depression. Novosibirsk, Nauka Publ., 1984, 126 p. (in Russian)
10. Kamaletdinov, V.A. Base relief and structure of the Quaternary cover in the Lena-Amga interfluve. Geology of the Cenozoic of Yakutia. Yakutsk, YaF SO AN SSSR, 1982, pp. 94–103. (in Russian)
11. Kolesnikov, A.B. Influence of modern climate parameters on the conditions of infiltration feeding of aquifers in Central Yakutia. Proc. National conference on underground waters in Eastern Russia. Yakutsk, IM SO RAN Publ., 2015, pp. 114–117. (in Russian)
12. Lytkina, L.P., Mironova, S.I. Postfire succession in a forest of the cryolithozone: the example of Central Yakutia. *Ekologiya*, 2009, no. 3, pp. 168–173. (in Russian)
13. Olenchenko, V.V., Gagarin, L.A., Khristoforov, I.I., Kolesnikov, A.B., Efremov, V.S. The structure of a site with thermal suffosion processes within Bestyakh terrace of the Lena River, according to geophysical data. *Kriosfera Zemli*, 2017, no. 5 (21), pp. 16–26. (in Russian)
14. Pavlova, N.A., Kolesnikov, A.B., Efremov, V.S., and Shepelev, V.V. Groundwater chemistry in intrapermafrost taliks in Central Yakutia. *Vodnye resursy*, 2016, no. 2 (43), pp. 216–227. (in Russian)
15. Pravkin, S.A., Bolshiyanov, D.Yu., Pomortsev, O.A., Savelieva, L.A., et al. The relief, structure and age of Quaternary deposits in the Lena River valley, the Yakutian bend] *Vestnik SPbGU*, 2018, no. 2 (63), pp. 209–229. (in Russian).
16. Rumyantsev, E.A. Icing process and the phenomenon of winter pressure suffusion. *Trudy Khabarovskogo in-ta inzhenerov zh/d transporta*, 1966, v. 21, pp. 4–15. (in Russian)
17. Semernya, A.A., Gagarin, L.A., Bazhin, K.I. Cryohydrogeological features of the site of intrapermafrost aquifer distribution at the Eruu spring area (Central Yakutia). *Kriosfera Zemli*, 2018, no. 2 (22), pp. 29–38. (in Russian)
18. Timofeev, P.A., Isaev, A.P., Shcherbakov, I.P. Forests of the middle taiga subzone in Yakutia. Yakutsk, YaNTs SO RAN Publ., 1994, 140 p. (in Russian)
19. Fedorov, A.N. Permafrost landscapes in Yakutia: identification technique and mapping issues. Yakutsk. IM SO RAN Publ., 1991. 140 p. (in Russian)
20. Shender, N.I., Boitsov, A.V., Tetelbaum, A.S. Formation of taliks and high-temperature frozen soil in Central Yakutia. Proc. the first conference of Russian geocryologists. Moscow, MGU Publ., 1996, book 1, vol. 3, pp. 525–537. (in Russian)
21. Shepelev, V.V. Evaluation of the erosion-suffosion activity of springs in Central Yakutia. *Izvestiya vuzov: Geologiya i razvedka*, 1972, no. 9, pp. 88–92. (in Russian)
22. Shepelev, V.V., Boitsov, A.V., Oberman, N.G., Petchenko, M.F., Sannikova, A.V., et al. Monitoring of underground waters in the cryolithozone. Yakutsk, IM SO RAN Publ., 2002, 172 p. (in Russian)
23. Shestakova, A.A. Mapping of permafrost landscapes taking into account vegetation successions (on the example of the Leno-Aldan interfluve). Sergeev Readings. The role of engineering geology and surveys at the pre-project stages of construction development of territories. Moscow, RUDN Publ., 2012, pp. 153–158. (in Russian)
24. Czudek, T., Demek, J. Thermokarst in Siberia and its influence on the development of lowland relief. *Quaternary Research*, 1970, no. 1 (1), pp. 103–120.
25. Embleton, C., Thornes, J.B. Process in geomorphology. New York, Wiley, 1979, 436 p.