

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 551.435.857:551.343.74

ОЦЕНКА ТЕРМОСУФФОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ НА ПРИМЕРЕ УЧАСТКА УЛАХАН-ТАРЫН

© 2016 г. Л. А. Гагарин, А. А. Семерня, Л. С. Лебедева

*Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН,
ул. Мерзлотная, 36, г. Якутск, 677010 Россия. E-mail: gagarinla@gmail.com*

Поступила в редакцию 01.06.2015 г.

В Центральной Якутии в пределах IV надпойменной террасы р. Лены широко развиты межмерзлотные подземные воды, инициирующие термосуффозионные процессы в областях их разгрузки. Наиболее масштабно термосуффозия проявляется в районе источника подземных вод Улахан-Тарын. Вследствие многолетних режимных мерзлотно-гидрогеологических и геодезических работ получены данные о формировании температурного режима горных пород слоя годовых теплооборотов, дебите источника Улахан-Тарын, химическом составе межмерзлотных подземных вод, их пьезометрическом уровне, гранулометрическом составе водовмещающих и перекрывающих мерзлых горных пород, строении рельефа местности и т.д. По результатам лабораторных исследований и широкого обобщения имеющихся материалов рассчитан гидравлический градиент подземных вод межмерзлотного водоносного горизонта, который в области разгрузки увеличивается на несколько порядков и достигает значения 0.1, получены данные о высокой однородности водовмещающих и многолетнемерзлых песков IV надпойменной террасы р. Лены (коэффициент неоднородности $\eta = 1.6-2.0$), построены ситуационные планы ключевых участков, отражающих развитие термосуффозионных провалов, и подсчитан ежегодный их прирост, оценена интенсивность процесса за полувековой период времени. Так, в цирке “Е” источника Улахан-Тарын с 2009 по 2013 г. приращение объема провалов в среднем составило 3125 м³/год, а в цирке “В” – 2259 м³/год. Современная интенсивность процесса по сравнению с таковой в 60-х годах прошлого века увеличилась в 1.2 раза.

Ключевые слова: термосуффозия, выпор, провалообразование, источник подземных вод, многолетнемерзлые породы, межмерзлотные воды, надмерзлотные воды.

ВВЕДЕНИЕ

В зарубежной литературе под термосуффозией (thermo-suffosion) понимают вымывание частиц грунта подземными водами, образованными при оттаивании подземного льда, т.е. термосуффозия рассматривается как стадия термокарстового процесса [31, 32]. В контексте данной работы под термосуффозией, вслед за В.В. Шепелевым, авторы понимают оттаивание дисперсных многолетнемерзлых горных пород под воздействием тепла фильтрующихся подземных вод, последующие их гидромеханическое разрушение и вынос. Термосуффозия не имеет такого широкого распространения в криолитозоне, как термокарст, тем не менее ландшафтные изменения земной поверхности, являющиеся ее следствием, происходят значительно быстрее и представляют серьезную опасность для инженерных сооруже-

ний. Так, Е.А. Румянцев наблюдал на Керакском наледном участке Забайкальской железной дороги формирование пещер в теле дорожной насыпи [22]. Развитие наблюдаемых им полостей приводило к образованию провалов, связанных с “зимней суффозией”. В 2013 г. в пос. Нижний Бестях в Центральной Якутии был обнаружен термосуффозионный овраг на территории Абаляхской грязелечебницы. Причиной его образования послужила аварийная утечка канализационных стоков и их последующая инфильтрация в деятельный слой. Вблизи федеральной трассы М-56 в Центральной Якутии существуют провалы поверхности земли, развитие которых может представлять угрозу ее устойчивости. Потенциально опасные участки развития подобного процесса встречаются и на территории г. Якутска.

К ИСТОРИИ ВОПРОСА

Первые сведения об образовании провалов на участках разгрузки подземных вод в пределах IV надпойменной террасы р. Лены в Центральной Якутии приведены Г.Н. Огневым [20]. Детальные гидрогеологические наблюдения в долине руч. Улахан-Тарын, где в настоящее время активно развиваются термосуффозионные процессы, впервые были проведены В.М. Максимовым и Н.И. Толстихиным в 1940 г. [19]. В последующем А.И. Ефимов провел мерзлотно-гидрогеологические исследования в районе источника Улахан-Тарын с применением буровых работ [16]. Им была дана оценка мощности многолетней мерзлоты и динамики деятельного слоя на исследуемой территории, обращено внимание на наличие высокотемпературных мерзлых пород и небольшую влажность грунтов в слое годовых теплооборотов. Кроме того, высказано предположение о надмерзлотном питании подземных вод источника Улахан-Тарын. Позднее, на основе более детальных гидрогеохимических исследований (1958–1964 гг.), этот вывод подтвердила Н.П. Анисимова [1, 2].

В 1966–1969 гг. В.В. Шепелевым впервые был изучен и описан механизм термосуффозионного

разрушения массива пород на IV надпойменной террасе р. Лены при исследовании режима источников подземных вод и формируемых ими наледей [26].

В 1973–1974 гг. А.В. Бойцовым и В.В. Шепелевым осуществлялись мерзлотно-гидрогеологические исследования на массиве перевеваемых песков Махатта, расположенного восточнее низовьев р. Тюнг, в бассейне нижнего течения р. Виллой [8, 27]. Авторами изучались источники подземных вод, приуроченные к циркуобразным и вытянутым понижениям рельефа, которые являются результатом термосуффозионной и эрозионной деятельности подземных вод межмерзлотного водоносного горизонта.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА
УЧАСТКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В климатическом отношении район исследований относится к северной подобласти восточно-сибирской континентальной лесной области умеренной зоны [12]. Климат резко континентальный. Количество выпадающих атмосферных осадков невелико, в среднем 250 мм, из них 70% приходится на летние месяцы. В зимний период

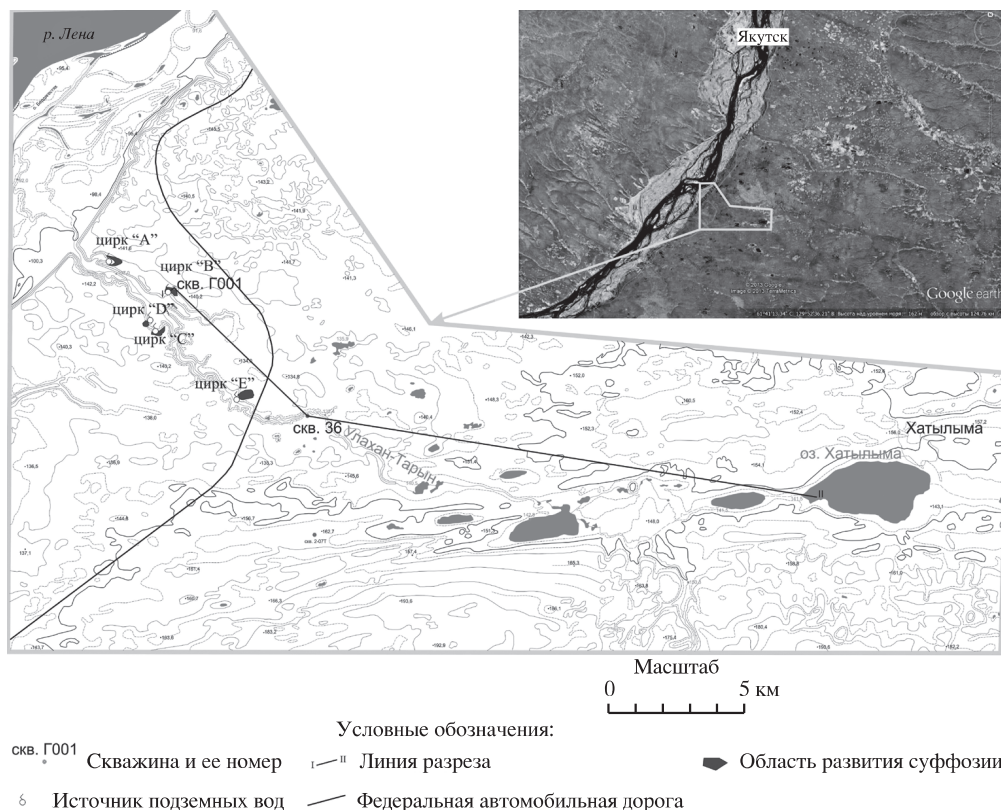


Рис. 1. Схема расположения участка исследований.

года исследуемая территория находится под влиянием Сибирского антициклона, что приводит к выхолаживанию земной поверхности. Средняя многолетняя высота снежного покрова составляет 28–31 см [11, 13].

Исследуемый участок расположен на IV надпойменной (бестяхской) террасе р. Лены (рис. 1), которую П.А. Соловьев относит к средневысотным аккумулятивно-эрозионным поверхностям [24]. В пределах изучаемой территории терраса занимает значительную часть правобережья р. Лены, протягиваясь от устья р. Буотамы до р. Алдан. Ширина террасы в устьевой части р. Лютенги составляет 2–3 км, а в районе пос. Намцы – более 30 км, она имеет хорошо выраженный крутой уступ, высота которого – порядка 30 м. Абсолютные отметки ее поверхности составляют 120–150 м. Поверхность террасы имеет сглаженный рельеф с неширокими вытянутыми песчаными грядами эолового происхождения высотой не более 5 м, закрепленными зрелым сосновым лесом средней степени плотности. Поверхность террасы расчленена долинами мелких притоков р. Лены (рр. Тамма, Менда, Лютенга и др.) и распадками глубиной 10–25 м, пологими возвышениями и озерными котловинами. Отмечены следы древних и современных пожаров. В южной части территории, где находятся крупные источники подземных вод, поверхность террасы осложнена термосуффозионными цирками, молодыми и древними провальными воронками.

В геологическом отношении цоколь IV надпойменной террасы р. Лены сложен карбонатными отложениями среднего кембрия амгинского-майского ярусов (C_2a-m), представленными трещиноватыми известняками и доломитами [15]. Мезозойские отложения в районе исследований представлены терригенными разномеристыми песчаниками укугутской свиты нижней юры (J_1uk). Отложения этой свиты с резким стратиграфическим и незначительным угловым несогласием залегают на породах кембрийского возраста восточнее и севернее источника Улахан-Тарын.

Аллювиальные отложения террасы сформированы в плейстоцен-голоценовое время. Они представлены средне-, мелкозернистыми серыми и желто-серыми горизонтально слоистыми песками мощностью до 50 м с гравийно-галечниковым слоем в основании. Верхняя часть IV надпойменной террасы сложена отложениями эолового происхождения. В отличие от аллювия, эоловые пески отличаются более крупной зернистостью и косой слоистостью, а их мощность составляет несколько метров [15].

Территория Центральной Якутии относится к области сплошного распространения многолетнемерзлых пород [17, 21, 24]. Сквозные талики существуют только под руслом р. Лены и крупными озерами [2, 7, 10, 16]. Мощность многолетнемерзлых пород на IV надпойменной террасе р. Лены достигает 350–420 м. Температура их на подошве слоя годовых теплооборотов составляет $-0.2 \div -0.5^\circ C$. На пониженных заболоченных участках речных долин мелких водотоков температура пород понижается до $-5 \div -6^\circ C$ [23]. Глубина слоя сезонного оттаивания колеблется в широких пределах: от 0.5–0.6 до 3.0–4.0 м [13, 17, 24].

На изучаемой территории в четвертичных отложениях и верхней части подстилающих их коренных пород развиты надмерзлотные и межмерзлотные талики. Подошва последних залегает на глубине 50 и более метров. Как правило, через указанные типы таликов происходит питание и движение подземных вод надмерзлотно-межмерзлотного комплекса, широко развитого в отложениях IV надпойменной террасы. Разгрузка подземных вод осуществляется в виде сконцентрированных восходящих и нисходящих источников, при этом выносятся большое количество песчаного материала.

Самый крупный источник подземных вод на исследуемой территории – Улахан-Тарын. Термосуффозионные процессы проявляются здесь наиболее активно. Разгрузка надмерзлотных и межмерзлотных вод приурочена к подножию террасы. Дебит этого источника во многом зависит от количества атмосферных осадков, его среднее многолетнее значение – 244 л/с [28]. Выходы подземных вод на дневную поверхность условно разделены на 5 групп (цирков) – “А”, “В”, “С”, “D”, “E” (см. рис. 1). Температура изливающейся на поверхность подземной воды в течение года постоянна и равна $0.2^\circ C$. В зимний период года в долине руч. Улахан-Тарын водами данного источника формируется гигантская наледь (длина до 5 км и средняя мощность 1.5–2.0 м).

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

На основе материалов коллектива лаборатории подземных вод криолитозоны Института мерзловедения им. П.И. Мельникова СО РАН, сотрудниками которого являются авторы, проведены детальные исследования механизма и динамики термосуффозионных процессов в Центральной Якутии (2009–2013 гг.).

Ключевыми участками выбраны цирки “В” и “Е”, где термосуффозия протекает наиболее активно. На участках была разбита сеть опорных геодезических реперов, термометрических и гидрогеологических скважин, оборудованных измерительной аппаратурой. Выбор наблюдательных полигонов обусловлен также наличием результатов аналогичных исследований в прошлом (цирк “В”) и наблюдением за начальной стадией развития процесса (цирк “Е”).

Для изучения влияния мерзлотного фактора на развитие термосуффозии проведены термометрические измерения в скважинах с использованием логгеров марки НОВО. Изучено распределение влажности горных пород по сезонам в пределах деятельного слоя.

Гидродинамические условия формирования исследуемого процесса оценены на основе результатов наблюдений за уровнем подземных вод межмерзлотного горизонта в скважине, расположенной в 30 м от бровки террасы. Кроме того, использована фоновая информация о напоре подземных вод в пределах развития надмерзлотно-межмерзлотного водоносного комплекса. Отобраны и проанализированы пробы воды источников на содержание химических компонентов, измерены дебиты родников.

Для изучения гранулометрического, минерального и солевого составов водовмещающих и перекрывающих их мерзлых горных пород в естественном обнажении цирка “Е” отобраны пробы песчаного материала. Точки отбора расположены в нижней части склона террасы на уровне дневной поверхности.

Анализ образцов проведен в лабораториях Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН инженерами Л.Ю. Бойцовой, И.В. Климовой и Н.Н. Ремизовой.

С целью изучения интенсивности образования термосуффозии провалов проведены геодезические работы с периодичностью 1–2 раза в год. С помощью программы Surfer осуществлено построение ситуационных планов местности и рассчитан ежегодный объем изменения рельефа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Большинство исследователей [5, 6, 9, 22, 25, 29] считают, что для развития суффозии необходимы условия: 1) наличие области выноса материала; 2) неоднородность гранулометрического состава отложений; 3) высокий градиент напора подземных вод.

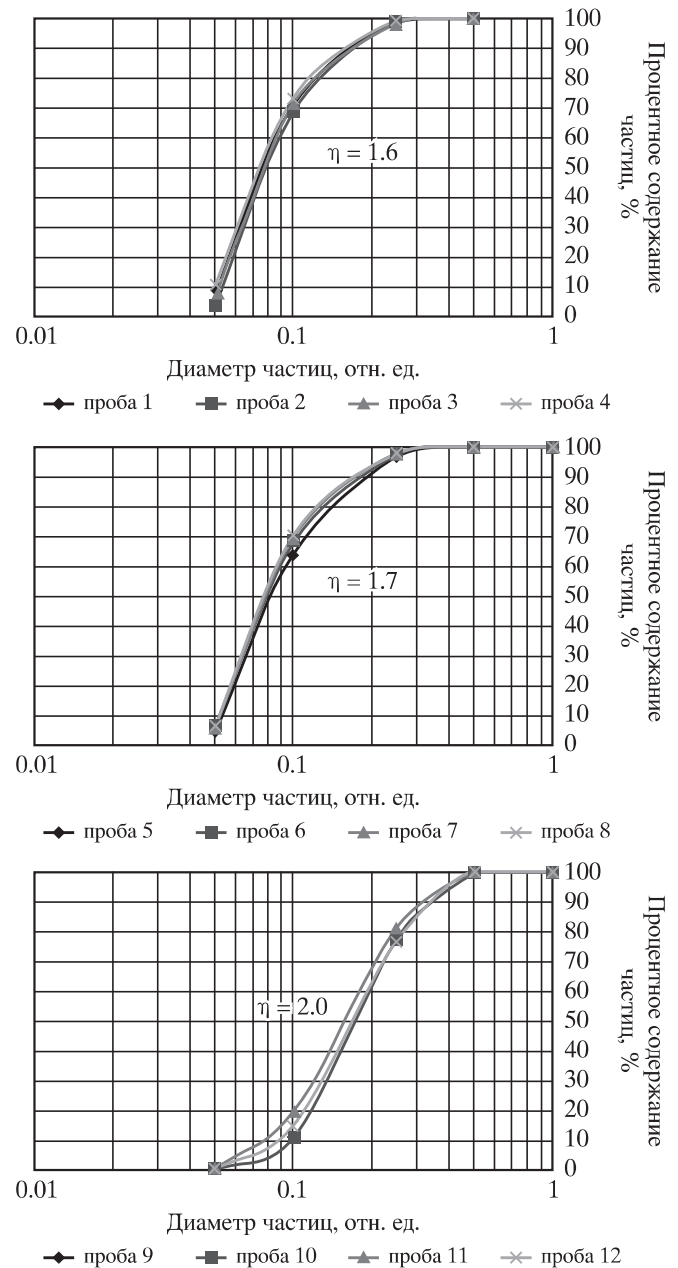


Рис. 2. Интегральные кривые весового распределения зерен песка, слагающего многолетнемерзлые породы (пробы 1–8) и межмерзлотный водоносный горизонт (пробы 9–11) на участке разгрузки подземных вод.

На исследуемом участке область выноса частиц горных пород межмерзлотными водами – долина руч. Улахан-Тарын. Разгрузка подземных вод и сопутствующая ей транспортировка песчаных частиц формируют широкие по площади конусы выноса. Кровлю межмерзлотного водоносного горизонта слагают пески мелкие с коэффициентом неоднородности $\eta = 1.6–1.7$ [14]. Образцы, отобранные из очага разгрузки подземных вод, представлены песком средней крупности. Коэффициент их неоднородности $\eta = 2$ (рис. 2). Минер-

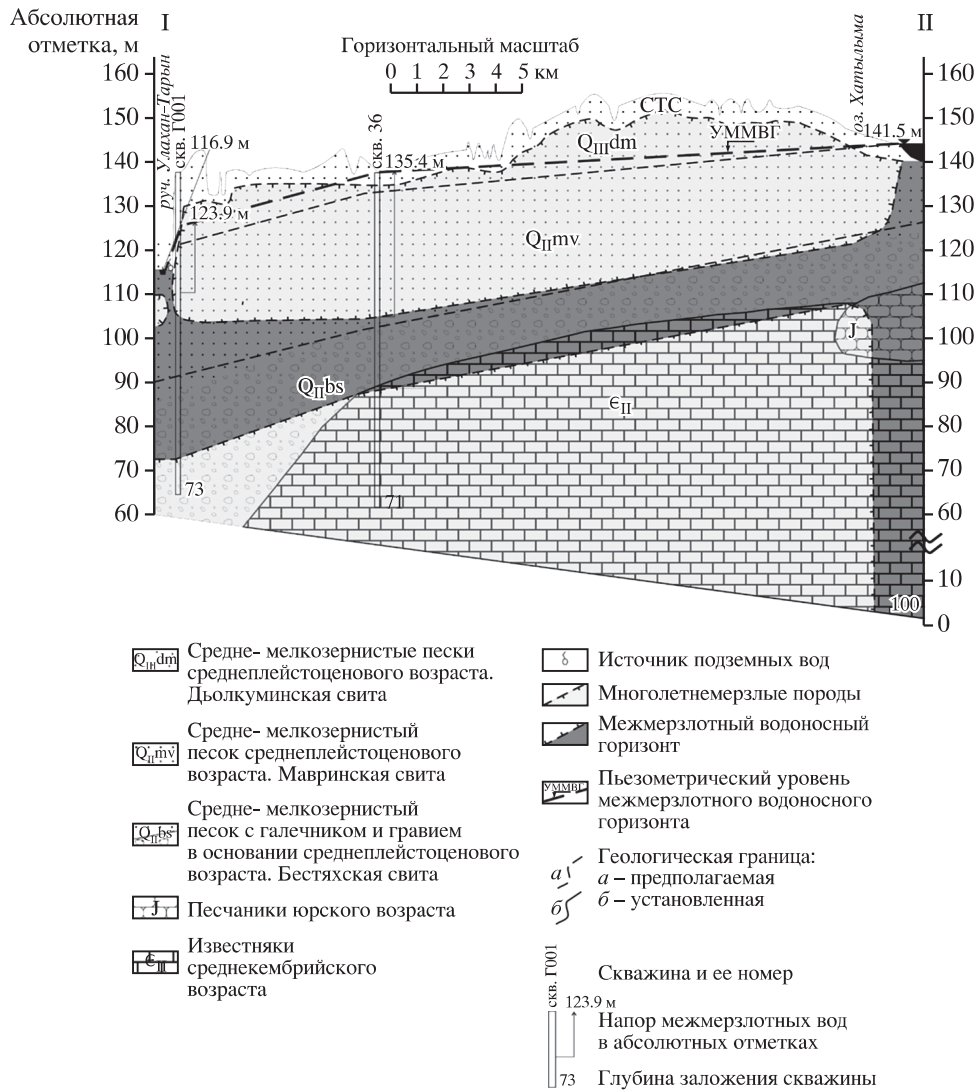


Рис. 3. Мерзлотно-гидрогеологический разрез по линии I-II.

ралогический анализ проб горных пород указывает на содержание в легкой фракции в основном кварца (до 46%) и полевого шпата (до 59%), а в тяжелой – амфиболов (до 64%), эпидота (до 13%) и сфена (до 11%). Минералы карбонатной группы отсутствуют практически полностью.

По классификации Н.А. Цытовича, исследуемые отложения относятся к незасоленным [30]. Следовательно, химическим воздействием межмерзлотных вод, приводящим к активизации термосуффозионных процессов на исследуемой территории, можно пренебречь.

В скважинах, приуроченных к областям питания и разгрузки, проведены замеры уровня межмерзлотных вод. Областью питания источника Улахан-Тарын служит сквозной талик под оз. Хатылыма, примерно в 15 км к востоку от зоны разгрузки [2, 3]. Гидравлический режим

межмерзлотного водоносного горизонта определяется колебанием уровня воды этого талика (абсолютная отметка уровня подземных вод составляет 141.5 м). По данным ПГО “Якутскгеология”, пьезометрический уровень воды межмерзлотного горизонта в скважине № 36 (рис. 3), пройденной в 11 км от оз. Хатылыма и в 4 км от зоны разгрузки, составил в абсолютных отметках 135.4 м. По результатам измерений в скважине Г001, расположенной в цирке “В” источника Улахан-Тарын, в летний период 2011 г. уровень межмерзлотных вод находился на абсолютной отметке около 123.9 м, а в зимний период этого года – на отметке 125.1 м [4, 13]. Таким образом, гидравлический градиент на отрезке от предполагаемой области их инфильтрационного питания до скважины 36 (расстояние 11 км) составляет 0.00055, а от скважины 36 до скважины Г001 (расстояние 4 км) – 0.00286. По мере движения подземных вод от области питания

к зоне разгрузки градиент уровня в межмерзлотном водоносном горизонте постепенно увеличивается. Например, в районе источника Улахан-Тарын его значение возрастает, достигая 0.1, что превосходит таковой в области транзита на несколько порядков. Следует отметить, что в результате термосуффузионных процессов в зоне разгрузки в песчаном водоносном массиве горных пород образуются промытые полости, в которых действительная скорость фильтрации сопоставима со скоростью движения воды в руч. Улахан-Тарын.

Вблизи зоны разгрузки подземных вод на поверхности террасы широко развиты понижения воронкообразной либо цилиндрической формы как без видимых трещин на поверхности земли, так и с трещинами отрыва. На участке цирка "Е" источника Улахан-Тарын провал цилиндрической формы диаметром 2 м и глубиной порядка 5 м был обнаружен авторами в марте 2009 г. в 30 м от бровки террасы. Вертикальные его стенки по всей глубине были разбиты трещинами. Песок в верхней части обнажившегося разреза имел рыхлое сложение, что косвенно свидетельствует о его низкой влажности. Поблизости отмечалось оврагообразное понижение, деревья на склонах которого были наклонены к его осевой части. В летний период 2009 г. проводилась тахеометрическая съемка местности, по результатам которой построен трехмерный план участка развития термосуффузионных провалов. Провалы в виде воронок прослеживались от цирка "Е" в глубь террасы на расстояние до 250 м. Развитие их происходило по двум линиям, сходящимся к зоне разгрузки подземных вод. На северной линии некоторые оврагообразные понижения обнаруживали тенденцию к слиянию в единое депрессионное образование. Здесь же по краям сформировавшихся термосуффузионных воронок наблюдались трещины отрыва. Объем термосуффузионных провалов составил 4158 м³.

Летом 2010 г. отмечалось увеличение размеров существующих и образование новых термосуффузионных воронок. В южной части исследуемого участка зафиксирована третья линия термосуффузионных понижений. Самая дальняя воронка образовалась примерно в 350 м от источника подземных вод. Объем термосуффузионных понижений в конце летнего периода 2010 г. составил 5 536 м³.

Весной 2011 г. в отдельных ранее сформированных воронках наблюдались свежие термосуффузионные провалы. Кроме того, зафиксирован рост цирка "Е" в глубь террасы. Отмечено

значительное увеличение размеров большинства воронок. Наиболее близкие к цирку "Е" провалы слились в единое понижение, но новых воронок не было зафиксировано. Общий объем провалов в 2011 г. на конец июня составил 8 431 м³, а на конец сентября – 9 599 м³.

В 2012 г. активизация термосуффузионных процессов продолжалась. В летний период новые провальные воронки возникли по всем трем ранее выявленным линиям понижений. В конце августа некоторые из них были затоплены. Уровень воды до глубины около 4 м находился ниже дневной поверхности. По минерализации вода в воронках отличалась от воды в источнике цирка "Е" (0.20 г/л) и больше соответствовала водам надмерзлотного стока (0.09 г/л).

Осенью 2012 г. обрушилась перемычка между цирком "Е" и ближайшими к нему воронками. Вследствие этого в долине руч. Улахан-Тарын сформировался песчаный конус выноса значительных размеров. Площадь его достигла 300 м², а мощность в верхней части составила порядка 1.5 м. Разгрузка подземных вод в виде грифонов сместилась в глубь террасы и происходила в месте бывшей крупной термосуффузионной воронки. Выход подземных вод находился пьезометрически выше предыдущего примерно на 1.5–2.0 м. В нижней части разреза обнажившегося склона террасы имелись линзы чистого льда и высокольдистых песков. По данным тахеометрической съемки в конце июля 2012 г. объем термосуффузионных понижений составил 10 709 м³, а к началу октября увеличился до 12 962 м³. В 2013 г. отмечено углубление ранее существовавших воронок и развитие термосуффузионного оврага, образованного в предыдущий год. В начале октября 2013 г. объем термосуффузионных понижений на участке цирка "Е" составил 16 658 м³.

В цирке "В" тахеометрическая съемка проводилась с 2009 г. с периодичностью один раз в год. Образование термосуффузионных провалов на этом участке протекало менее интенсивно, чем в цирке "Е". Однако и здесь наблюдались трещины отрыва пород вблизи бровки террасы, оползни различных размеров и рост оврага. По данным тахеометрии, объем провалов земной поверхности в 2009 г. составил 240 692 м³. Следует отметить, что полученная цифра отражает объем всего цирка, сформированного ранее, до начала наблюдений.

Летом 2010 г. на участке продолжалось развитие термосуффузионного оврага, врезанного в юго-восточную часть цирка "В". На осталь-

ной территории каких-либо изменений на поверхности террасы не наблюдалось. Суммарный объем цирка «В» и термосуффозионных понижений на террасе вблизи него в 2010 г. составил 242 297 м³, а летом 2011 г. объем депрессий достиг 245 883 м³.

В конце августа 2012 г. в юго-восточном борту оврага была обнаружена полость. Вход в нее имел ширину около 2 м и высоту примерно 3 м. Видимая часть полости представляла собой изгибающийся канал длиной 6 м. Задней стенки полости зафиксировать не удалось. Высота свода составляла около 4 м. Стенки находились в мерзлом состоянии. Линз и прослоев чистого льда обнаружено не было. Общий объем провалов в цирке «В» за 2012 г. увеличился до 248 732 м³. В последующую зиму 2012–2013 гг. всю полость заполнила наледь. В конце сентября 2013 г. объем депрессионных понижений в районе цирка «В» составил 249 728 м³.

ВЫВОДЫ

Гранулометрический состав отложений межмерзлотного водоносного горизонта с коэффициентом неоднородности $\eta = 2$ и высокое значение градиента напора подземных вод на участках их разгрузки ($I \approx 0.1$) способствуют формированию разновидности суффозионного выноса, называемого выпором [18]. В результате формируется локальная напорная разгрузка подземных вод в виде грифонов [13].

Такого типа источники характеризуются пульсацией воды. Эффект пульсации был описан Н.М. Бочковым [9]. На основе анализа проведенных опытов он отмечает: «...с возрастанием напора, вследствие того, что пропускная способность узких сечений изменяется в большей степени, чем в расширенных частях, в потоке образуются разрывы движения и возникают гидравлические удары, создающие впечатления смятия жидкости в расширенных областях, с возникновением вихревых петель в застойных зонах...» [9]. По мнению Н.М. Бочкова, подобный режим потока, названный эжекционным, характерен лишь при выклинивании депрессионной кривой уровня подземных вод на косогорах, вблизи фильтров буровых скважин и т.д.

Изменение объемов провалообразования в цирках «Е» и «В» источника подземных вод Улахан-Тарын за период наблюдений отражено на графике (рис. 4). Вынос наибольшего количества песка подземными водами произошел с 2010 по 2011 гг. Это связано с увеличением дебита источ-

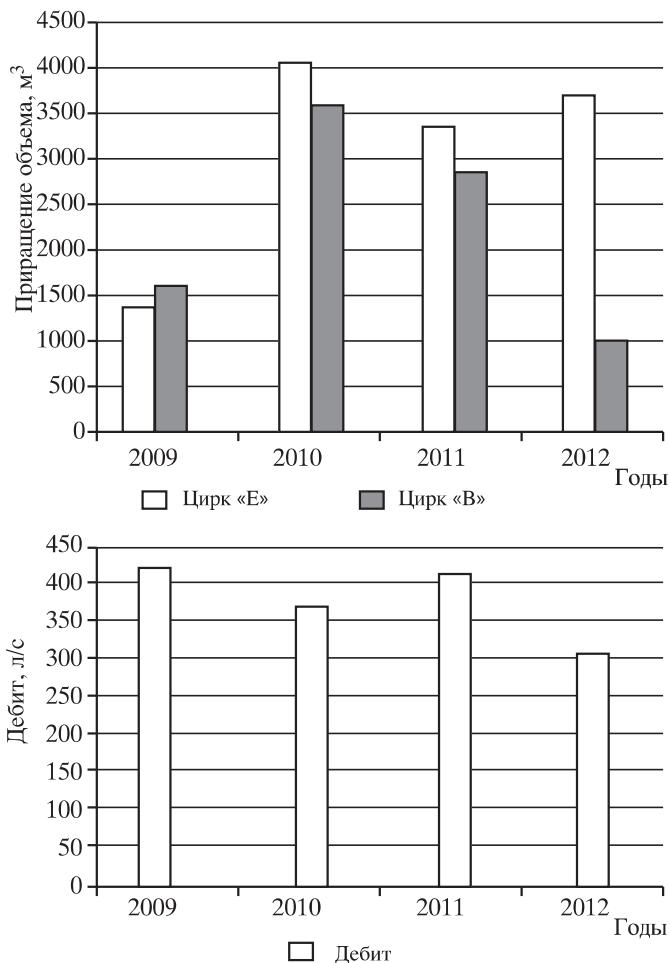


Рис. 4. Приращение объемов термосуффозионных провалов в цирках «Е» и «В» и дебит источника Улахан-Тарын за 2009–2013 гг.

ников Улахан-Тарын в 2011 г. до 415 л/с, и, соответственно, повышением скорости фильтрации подземных вод.

По оценкам В.В. Шепелева, в 1966–1967 гг. приращение объема термосуффозионных провалов в цирке «В» составило 1 820 м³/год [26]. При сравнении этой цифры с полученными в 2009–2013 гг. данными напрашивается вывод об интенсификации термосуффозионного провалообразования на исследуемом участке за почти полувековой период.

Анализ изменения рельефа террасы на ключевых участках не выявил зависимости интенсивности образования провалов от сезонов года. Следует также отметить, что просадки поверхности происходили не только вблизи бровки IV надпойменной террасы р. Лены, но и на определенном удалении от нее, где сезонные изменения температуры горных пород никак не влияют на прочностные характеристики многолетнемерзлой

кровли, перекрывающей межмерзлотный водоносный горизонт.

Многолетнее развитие термосуффузионных воронок, как было указано ранее, со временем приводит к формированию оврагов. Цирк “Е” находится в начальной стадии подобного процесса. Вероятно, в зависимости от геометрических размеров межмерзлотного водоносного горизонта на участке разгрузки подземных вод и условий промерзания водонасыщенных пород термосуффузионные процессы могут затухать, образуя балку. Анализ космоснимков участка долины руч. Улахан-Тарына свидетельствует о существовании многочисленных балок различной протяженности. Так, в 20 м к северу от цирка “Е” расположена балка, заросшая травянистой растительностью, мелкими листовыми растениями и соснами. Параллельно ей в глубь террасы прослеживается несколько термосуффузионных воронок, размер которых на протяжении всего периода наших наблюдений в цирке “Е” не изменился, эти воронки покрыты различной растительностью.

Мерзлотно-гидрогеологические, геоморфологические и гидроклиматические условия IV надпойменной террасы р. Лены (Центральная Якутия) обуславливают своеобразие механизма и интенсивности развития термосуффузионных процессов. Особенно интенсивно они протекают в районе источника подземных вод Улахан-Тарына. В цирке “Е” этого источника с 2009 по 2013 гг. приращение объема провалов в среднем составило 3 125 м³/год, а в цирке “В” – 2 259 м³/год. По сравнению с подобной оценкой, проведенной на источнике Улахан-Тарын в 1966–1967 гг., интенсивность образования провалов увеличилась в 1.2 раза.

Масштаб и скорость развития термосуффузии представляют серьезную опасность для различных инженерных сооружений. В связи с этим необходимо дальнейшее проведение исследований механизма и динамики термосуффузии для прогноза и разработки рекомендаций по борьбе с нежелательными последствиями этого процесса.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-45-05053-р_восток_a) и гранта “Научно-образовательный фонд поддержки молодых ученых Республики Саха (Якутия)” 201302010087.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимова Н.П. Некоторые особенности формирования химического состава озерного и наледного льда в Центральной Якутии // Наледи Сибири. М.: Наука, 1969. С. 183–190.
2. Анисимова Н.П. Формирование химического состава подземных вод таликов (на примере Центральной Якутии). М.: Наука, 1971. 196 с.
3. Анисимова Н.П. Криогидрогеохимические особенности мерзлой зоны. Новосибирск: Наука, 1981. 153 с.
4. Анисимова Н.П., Павлова Н.А. Гидрогеохимические исследования криолитозоны Центральной Якутии. Новосибирск: Академ. изд-во “Гео”, 2014. 189 с.
5. Анисимов А.В. Суффозия. Классификация процесса // Геоэкология. 2006. № 2. С. 151–155.
6. Анисимов А.В. Суффозия. Механизм и кинематика свободной суффозии // Геоэкология. 2006. № 6. С. 544–553.
7. Балобаев В.Т., Иванова Л.Д., Никитина Н.М., Шепелев В.В., Ломовцева Н.С., Скутин В.И. Подземные воды Центральной Якутии и перспективы их использования / Отв. ред. Н.П. Анисимова. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал “Гео”, 2003. 137 с.
8. Бойцов А.В., Шепелев В.В. Мерзлотно-гидрогеологические условия массива развееваемых песков Махатта (Центральная Якутия) // Гидрогеологические исследования криолитозоны / Под ред. В.М. Пигузова. Якутск: Изд-во ИМЗ СО АН СССР, 1976. С. 25–35.
9. Бочков Н.М. Механическая суффозия грунта. М.: ОНТИ, 1936. 46 с.
10. Вельмина Н.А., Ефимов А.И., Зайцев И.К., Кононова Р.С., Толстихин О.Н. Гидрогеология СССР. Т. XX. Якутская АССР. М.: Недра, 1970. 383 с.
11. Гаврилова М.К. Метеорологические наблюдения в наледной долине Улахан-Тарын // Наледи Сибири / Ред. О.Н. Толстихин, В.М. Пигузова. М.: Наука, 1969. С. 90–106.
12. Гаврилова М.К. Климаты холодных регионов Земли. Якутск: Изд-во СО РАН, 1998. 206 с.
13. Гагарин Л.А. Динамика термосуффузионных процессов в криолитозоне (на примере Центральной Якутии) // Автореф. дис.... канд. геол.-мин. наук. Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2013. 22 с.
14. ГОСТ 25100-95. Грунты. Классификация. М.: Изд-во стандартов, 1996. 29 с.
15. Гриненко В.С., Камалетдинов В.А., Слестенов Ю.Л., Щербаков О.И. Геологическое строение Большого Якутска // Региональная геология Якутии. Якутск: Изд-во ЯГУ, 1995. С. 3–19.
16. Ефимов А.И. Незамерзающий пресный источник Улахан-Тарын в Центральной Якутии // Исследование вечной мерзлоты в Якутской республике. М.: Изд-во АН СССР, 1952. № 3. С. 60–105.
17. Иванов М.С. Криогенное строение четвертичных отложений Лено-Алданской впадины. Новосибирск: Наука, 1984. 126 с.

18. Истомина В.С. Фильтрационная устойчивость грунтов. М.: Госстройиздат, 1957. 295 с.
19. Максимов В.М., Толстихин Н.И. К вопросу о гидрогеологических условиях окрестностей Якутска // Докл. АН СССР. 1940. Т. 28. № 1. С. 14–20.
20. Огнев Г.Н. Геологические наблюдения на Лено-Амгинском водоразделе // Матер. комиссии по изучению ЯАССР. 1927. № 22. С. 71.
21. Романовский Н.Н., Гаврилов А.В., Зайцев В.Н., Лицицына О.М., Нистратова Т.А., Пармузин С.Ю. Геокриология СССР: Восточная Сибирь и Дальний Восток. М.: Недра, 1989. 514 с.
22. Румянцев Е.А. Наледный процесс и явление зимней напорной суффозии // Тр. Хабаровского ин-та инженеров ж/д транспорта. 1966. № 21. С. 4–15.
23. Скрябин П.Н., Варламов С.П., Скачков Ю.Б. Мониторинговые исследования температурного режима грунтов Центральной Якутии // География и природные ресурсы. 1998. № 2. С. 49–55.
24. Соловьев П.А. Криолитозона северной части Лено-Амгинского междуречья. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 143 с.
25. Терцаги К., Пек Р. Механика грунтов в инженерной практике. М.: Госстройиздат, 1958. 607 с.
26. Шепелёв В.В. Оценка эрозионно-суффозионной деятельности источников Центральной Якутии // Изв. вузов. Геология и разведка. 1972. № 9. С. 88–92.
27. Шепелев В.В. О взаимосвязи озер и подземных вод на массивах развееваемых песков Центральной Якутии // Гидрогеологические условия мерзлой зоны / Под ред. В.В. Шепелева. Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 1976. С. 46–59.
28. Шепелев В.В., Бойцов А.В., Оберман Н.Г., Петченко М.Ф., Анисимова Н.П., Какунов Н.Б., Максимова Е.Н., Завадский Ф.Р., Санникова А.В. Мониторинг подземных вод криолитозоны. Якутск: Изд-во ИМ СО РАН, 2002. 172 с.
29. Хоменко В.П. Закономерности и прогноз суффозионных процессов. М.: ГЕОС, 2003. 216 с.
30. Цытович Н.А. Физические и механические свойства засоленных грунтов // Матер. II Междунар. конф. по мерзлотоведению: доклады и сообщения. Якутск: Изд-во ИМЗ СО АН СССР, 1973. Т. 4. С. 40–52.
31. Czudek T., Demek J. Thermokarst in Siberia and its influence on the development of lowland relief // Quaternary Research. 1970. V. 1. Iss. 1. P. 103–120.
32. Embleton C., Thornes J.B. Process in geomorphology. N. Y.: Wiley, 1979. 436 p.
1. Anisimova, N.P. *Nekotorye osobennosti formirovaniya khimicheskogo sostava ozernogo i nalednogo l'da v Tsentral'noi Yakutii* [Some features of chemical composition formation of lake ice and icings in Central Yakutia]. *Naledi Sibiri* [Icings in Siberia], 1969, pp. 183–190 (in Russian).
2. Anisimova, N.P. *Formirovanie khimicheskogo sostava podzemnykh vod talikov (na primere Centralnoi Yakutii)* [Formation of chemical composition of talik groundwater in Central Yakutia]. Moscow, Nauka Publ., 1971, 196 p. (in Russian).
3. Anisimova, N.P. *Kriogidrokhimicheskie osobennosti merzloi zony* [Cryo-hydrogeochemical features of permafrost zone]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1981, 153 p. (in Russian).
4. Anisimova, N.P., Pavlova, N.A. *Gidrogeokhimicheskie issledovaniya kriolitozony Tsentralnoi Yakutii* [Hydrogeochemical studies in cryolithozone of Central Yakutia]. Novosibirsk, Geo Publ., 2014, 189 p. (in Russian).
5. Anikeev, A.V. *Suffoziya. Klassifikatsiya protsessov* [Suffosion. Process classification]. *Geoekologiya*, 2006, no. 2, pp. 151–155 (in Russian).
6. Anikeev, A.V. *Suffoziya. Mekhanizm i kinematika svobodnoi suffozii* [Suffosion. Mechanism and kinematic of suffosion]. *Geoekologiya*, 2006, no. 6, pp. 544–553 (in Russian).
7. Balobaev, V.T., Ivanova, L.D., Nikitina, N.M., Shepelev, V.V., Lomovtseva, N.S., Skutin, V.I. *Podzemnye vody Tsentralnoi Yakutii i perspektivi ikh ispol'zovaniya* [Groundwater of Central Yakutia and perspective of its using]. Novosibirsk, Geo Publ., 2003, 137 p. (in Russian).
8. Boitsov, A.V., Shepelev, V.V. [Cryohydrogeologic conditions of the Makhatta dyne, Central Yakutia]. *Gidrogeologicheskie issledovaniya kriolitozony* [Hydrogeological studies in cryolithozone], 1976, pp. 25–35 (in Russian).
9. Bochkov, N.M. *Mekhanicheskaya suffoziya grunta* [Mechanical suffusion of a ground]. Moscow, ONTI Publ., 1936, 46 p. (in Russian).
10. Velmina, N.A., Efimov, A.I., Zaitsev, I.K., Kononova, R.S., Tolstikhin, O.N. *Gidrogeologiya SSSR. T. XX* [Hydrogeology of the USSR, Vol. XX]. Moscow, Nedra Publ., 1970, 383 p. (in Russian).
11. Gavrilova, M.K. *Meteorologicheskie nablyudeniya v nalednoi doline Ulakhan-Taryn* [Meteorologic observations in the Ulakhan-Taryn icing valley]. *Naledi Sibiri* [Icings of Syberia], 1969, pp. 90–106 (in Russian).
12. Gavrilova, M.K. *Klimaty kholodnykh regionov Zemli* [Climate of cold regions of the Earth]. Yakutsk, SB RAS Publ., 1998, 206 p. (in Russian).
13. Gagarin, L.A. *Dinamika termosuffuzionnykh protsessov v kriolitozone (na primere Centralnoi Yakutii)*. Diss. dokt. geol.-min. nauk [Dynamics of thermal-suffosion processes in cryolithozone, Central Yakutia. Doctoral Diss. (Geol.-Min.)]. Yakutsk, MPI SB RAS Publ., 2013, 22 p. (in Russian).

REFERENCES

14. GOST 25100-95. *Grunty. Klassifikatsia* [State Standard 25100-95. Grounds. Classification]. Moscow, Standartinform Publ., 1996, 29 p. (in Russian).
15. Grinenko, V.S., Kamaletdinov, V.A., Slastenov, Yu.L., Sherbakov, O.I. *Geologicheskoe stroenie Bol'shogo Yakutska* [Geological structure of Great Yakutsk territory]. *Regional'naya geologiya Yakutii* [Yakutia Regional Geology], 1995, pp. 3–19 (in Russian).
16. Efimov, A.I. *Nezamerzayushchii presnyi istochnik Ulakhan-Taryn v Tsentral'noi Yakutii* [The unfrozen freshwater Ulakhan-Tarin spring]. *Issledovanie vechnoi merzloty v Yakutskoi respublike* [Permafrost study in Yakutia Republic], 1952, no. 3, pp. 60–65 (in Russian).
17. Ivanov, M.S. *Kriogennoe stroenie chetvertichnykh otlozhenii Leno-Aldanskoi vpadini* [Cryogenic structure of Quaternary sediments in Lena-Aldan depression]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1984, 126 p. (in Russian).
18. Istomina, V.S. *Fil'tratsionnaya ustoichivost' gruntov* [Filtrational stability of soils and rocks]. Moscow, Gosstroizdat Publ., 1957, 295 p. (in Russian).
19. Maksimov, V.M., Tolstikhin, N.I. *K voprosu o gidrogeologicheskikh usloviyakh okrestnostei Yakutska* [About hydrogeological conditions of Yakutsk surroundings]. *Doklady AN SSSR, T. 28* [AS USSR Reports, vol. 28], 1940, no. 1, pp. 14–20 (in Russian).
20. Ognev, G.N. *Geologicheskie nablyudeniya na Leno-Amginskom vodorazadele* [Geological observations at Lena-Amga watershed divide]. *Materialy komissii po izucheniyu YASSR* [Proc. of committee of YSSR study], 1927, no. 22, 71 p. (in Russian).
21. Romanovskii, N.N., Gavrilov, A.V., Zaitsev V.N., Lisitsina, O.M., Nistratova, T.A., Parmuzin, S.Yu. *Geokriologiya SSSR: Vostochnaya Sibir' i Dal'nii Vostok* [Geocryology of the USSR: the Eastern Siberia and the Far East]. Moscow, Nedra Publ., 1989, 514 p. (in Russian).
22. Rumyantsev, E.A. *Nalednyi protsess i yavlenie zimnei napornoj suffozii* [Icing and phenomenon of winter piping]. *Trudy Khabarovskogo instituta inzhenerov zh/d transporta* [Proc. of Khabarovsk railroad transport engineers Institute], 1966, no. 21, pp. 4–15 (in Russian).
23. Skryabin, P.N., Varlamov, S.P., Skachkov, Yu.B. *Monitoringovye issledovaniya temperaturnogo rezhima gruntov Tsentralnoi Yakutii* [Monitoring study of ground temperature regime, Central Yakutia]. *Geografiya i prirodnye resursy* [Geography and natural resources], 1998, no. 2, pp. 49–55 (in Russian).
24. Solovyov, P.A. *Kriolitizona severnoi chasti Leno-Amginskogo mezhdurech'ya* [Cryolithozone of the northern part of Lena-Amga watershed divide]. Moscow, AS USSR Publ., 1959, 143 p. (in Russian).
25. Terzaghi, K., Pek, R. *Mekhanika gruntov v inzhenernoi praktike* [Soil mechanics in engineering practice]. Moscow, Gosstroizdat Publ., 1958, 607 p. (in Russian).
26. Shepelev, V.V. *Otsenka erozionno-suffuzionnoi deyatel'nosti istochnikov Tsentralnoi Yakutii* [Assessment of erosion and suffusion actions of springs in Central Yakutia]. *Izvestiya vuzov. Geologiya i irazvedka*, 1972, no. 9, pp. 88–92 (in Russian).
27. Shepelev, V.V. [About relationships between lakes and groundwater at dunes, Central Yakutia]. *Gidrogeologicheskie usloviya merzloy zony* [Hydrogeological conditions of frozen zone], 1976, pp. 46–59 (in Russian).
28. Shepelev, V.V., Boitsov, A.V., Oberman, N.G., Petchenko, M.F., Anisimova, N.P., Kakunov, N.B., Maksimova, E.N., Zavadskii, F.R., Sannikova, A.V. *Monitoring podzemnykh vod kriolitozony* [Groundwater monitoring in cryolithozone]. Yakutsk, MPI SB RAS Publ., 2002, 172 p. (in Russian).
29. Khomenko, V.P. *Zakonomernosti i prognoz suffuzionnykh protsessov* [Regularities and forecast of suffusion]. Moscow, GEOS Publ., 2003, 216 p. (in Russian).
30. Tsytovich, N.A. [Physical and mechanical features of saline soils]. *Materialy II Mezhdunarodnoi konferentsii po merzlotovedeniyu: doklady i soobshcheniya* [Proc. of II Intern. Conf. on permafrost: reports and theses], 1973, no. 4, pp. 40–2 (in Russian).
31. Czudek, T., Demek J. Thermokarst in Siberia and its influence on the development of lowland relief. *Quaternary Research*, 1970, vol. 1, 103–20 pp.
32. Embleton, C, Thornes J. B. Process in geomorphology. New York, Wiley Publ., 1979, 436 p.

ASSESSMENT OF THERMAL SUFFOSION IN CENTRAL YAKUTIA BY THE EXAMPLE OF ULAKHAN-TARYN SITE

L. A. Gagarin, A. A. Semernya, L. S. Lebedeva

*Melnikov Permafrost Institute, Siberian Division RAS, Merzlotnaya st. 36, Yakutsk, 677010 Russia.
E-mail: gagarinla@gmail.com*

Thermal suffosion is defined by authors as thawing of fine-grained permafrost soils due to heat of percolating groundwater accompanied by hydromechanical crushing and subtraction. Intrapermafrost groundwater is widely spread at the IV Lena river terrace in Central Yakutia. It initiates thermal suffosion processes in the groundwater discharge area. Thermal suffosion processes are the most active nearby the Ulakhan-Taryn groundwater spring. The data describing the formation of temperature regime of a zero annual temperature fluctuations layer, the discharge of the Ulakhan-Taryn spring, the chemical composition of intrapermafrost groundwater, its piezometric level, the grain-size composition of water-bearing material and overlying frozen layer, as well as the territory relief are obtained from long-term regime permafrost-hydrogeological and geodetic survey. The pressure gradient of intrapermafrost groundwater is calculated proceeding from the results of laboratory studies and wide generalization of available materials. The pressure gradient increases in the discharge area in several times to reach 0.1. Data on high homogeneity (heterogeneity coefficient $\eta = 1.6-2.0$) of water-bearing material and perennially frozen sand are obtained for the IV Lena river terrace. The surface plans of key sites are built showing the development of thermal-suffosion depressions. Their annual increment and process intensity for the 50-year-long period are assessed. For 2009–2013, the depressions' volume increased by 3 125 and 2 259 m³/year in the circuses "E" and "B" of Ulakhan-Taryn spring, respectively. The process's intensity has risen by 1.2 times at present as compared to that in 1960s.

Keywords: *thermal suffosion, uplift, caving, groundwater spring, permafrost, intrapermafrost groundwater, suprapermafrost groundwater.*