

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 551.435.7:624.139.2

**АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА ОБРАЗОВАНИЯ ПРОВАЛОВ
В МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ НА УЧАСТКЕ РАЗВИТИЯ
МЕЖМЕРЗЛОТНЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД С ПОЗИЦИЙ ФОРМИРОВАНИЯ
ДИССИПАТИВНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР**

© 2023 г. Г. П. Постоев^{1,*}, Л. А. Гагарин^{2,**}, А. И. Казеев^{1,***},
М. М. Кучуков^{1,****}, Н. А. Павлова²

¹Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН),
Уланский пер., 13, стр.2, Москва, 101000 Россия

²Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН,
ул. Мерзлотная, 36, Якутск, Республика Саха (Якутия), 677010 Россия

*E-mail: postoev.german@yandex.ru

**E-mail: gagarinla@gmail.com

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

****E-mail: kuchukov.m@gubkin.ru

Поступила в редакцию 28.02.2023 г.

После доработки 30.03.2023 г.

Принята к публикации 03.05.2023 г.

Рассматриваются опасные проявления на земной поверхности в виде провалов на территории Центральной Якутии в пределах надпойменной террасы р. Лена, на участках развития межмерзлотных подземных вод. Анализируются материалы мониторинга и геофизических работ на участках проявления провалов. Исследуются возможные механизмы образования провалов в результате развития термосуффозии и образования диссипативных геологических структур.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, провал, подземная полость, термосуффозия, талик, диссипативные геологические структуры (ДГС), межмерзлотные подземные воды, параметры провала

DOI: 10.31857/S0869780923030098, EDN: WNESKD

ВВЕДЕНИЕ

Образование провалов земной поверхности на территории распространения многолетнемерзлых пород (ММП) — нередкие события. Хорошо известны и широко распространены термокарстовые провалы, которые возникают в сезонном слое при оттаивании ММП. В последнее время повышенное внимание уделяется исследованиям более глубоких провалов, особенно после обнаружения так называемого “Ямальского кратера”; чаще всего причины подобных проявлений увязываются с газовыми выбросами. Образование провалов и воронок на участках развития межмерзлотных подземных вод в основном представляют следствием протекания термосуффозионных процессов [1–4]. Подземные воды оказывают механическое и тепловое воздействие на вышележащие мерзлые горные породы, размывают их и образуют пустоты (полости) в песчаном массиве. С течением времени происходит локальное обрушение кровли полости, а на дневной поверхности массива образуется провал. Несмотря на специ-

фику развития криогенных процессов, в подготовке и проявлении провалов в области криолитозоны намечается связь с подобными явлениями и на территориях распространения карстующихся пород и горных выработок [8]. Ряд специалистов также увязывают возникновение провалов в подземные полости с суффозионными процессами [8].

В соответствии с новым направлением исследований, подготовка провала над подземной полостью обуславливается образованием в вышележащей над ней толще пород диссипативных геологических структур (ДГС), которые рассматриваются как проявление защитной реакции геологической среды от изменения исходного напряженно-деформированного состояния (НДС) и распространения разрушительных деформаций в массиве. Именно ДГС локализует зону разрушительных деформаций и определяет границы формируемого явления, в частности провала. Установлено, что формирование ДГС в массиве регламентирует образование нового блока на оползневом участке, подготовку



Рис. 1. Аэрофотоснимок цирка “А” в долине руч. Улахан-Тарын.

предельного состояния и деформирование грунтового основания в виде выпора из-под подошвы фундамента, тем самым подтверждая универсальность выявленных геологических закономерностей [6, 7].

Цель настоящей работы — рассмотрение возможности применения нового подхода с учетом образования ДГС для выявления и расчета параметров провала в ММП над межмерзлотным водоносным таликом на примере участка Улахан-Тарын в Центральной Якутии.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Участок расположен на IV надпойменной (бестяхской) террасе р. Лена, с абсолютными отметками ее поверхности 120–150 м. Рельеф террасы сглаженный. Долины мелких притоков р. Лена и распадки образуют углубления до 10–30 м. Глубина вреза руч. Улахан-Тарын достигает 30 м. Провальные образования на поверхности террасы (диаметром от первых метров до 30 м и глубиной от 1–2 м до 15 м) наблюдаются в области разгрузки подземных вод, приуроченной к нижнему течению ручья. Аллювиальные отложения террасы представлены средне- и мелкозернистыми песками мощностью до 90 м с гравийно-галечниковым слоем в основании. Мощность ММП на участке исследований достигает 420 м.

В четвертичных отложениях и в верхней части подстилающих их коренных пород развиты надмерзлотные и межмерзлотные талики. Подошва

последних залегает на глубине 50 и более метров. Питание родников, приуроченных к долине руч. Улахан-Тарын, осуществляется через сеть подозерных и субаэральных надмерзлотных таликов, расположенных на расстоянии до 25 км. Транзит подземных вод происходит по межмерзлотным таликовым зонам. Воды эти напорные, имеющие уровень до 8–9 м от поверхности земли при залегании кровли межмерзлотного горизонта в среднем на глубине 27–30 м. В местах разгрузки подземных вод образуются врезанные в поверхность бестяхской террасы “цирки” (рис. 1), куда происходит вынос песчаного материала. Зимой в долине руч. Улахан-Тарын образуется наледь¹ длиной до 5 км при средней толщине льда 1.5–2.0 м.

МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ПРОВАЛА В РЕЗУЛЬТАТЕ ТЕРМОСУФФОЗИОННОГО ПРОЦЕССА

Под термосуффозией понимается оттаивание дисперсных ММП под воздействием тепла фильтрующегося подземного потока, их последующее гидромеханическое разрушение и вынос [3, 9]. В результате процессов термосуффозии изменяется положение кровли межмерзлотного водоносного горизонта, уменьшается мощность перекрывающего его криогенного водоупора и формируются локальные ответвления талика вверх к участкам возможного образования провалов земной поверхности.

¹ Улахан-Тарын или Большая Момская наледь — крупнейшая речная наледь мира, находится на р. Мома.

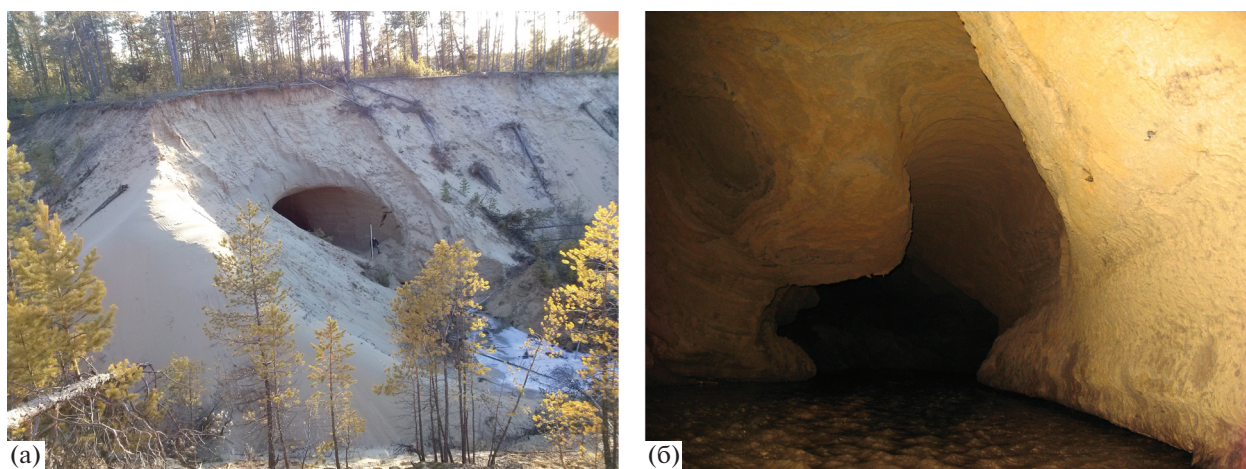


Рис. 2. Пещеры в склоне бестяхской террасы р. Лена в долине руч. Улахан-Тарын, образуемые в результате действия термосуффозионных процессов: а — вид с поверхности, б — вид изнутри.



Рис. 3. Провал термосуффозионного происхождения в долине руч. Улахан-Тарын.

Развитию термосуффозии способствуют: значительный градиент напора межмерзлотных подземных вод в области их разгрузки, достигающий величины 1.1; увеличение пористости пород за счет теплового и механического воздействия подземных вод и вынос песчаных частиц. В результате в песчаном массиве образуются полости и пещеры (рис. 2), в которых происходит резкая смена напорных условий фильтрации подземных вод *межмерзлотного водоносного горизонта* (ММВГ) на безнапорные.

Многолетнее развитие термосуффозии приводит к увеличению размеров образуемых полостей/пещер. Под действием напорных вод ММВГ и геостатического давления происходит локальное обрушение кровли полости при достижении критического соотношения между ее шириной и высотой, а на дневной поверхности образуется провал или воронка [1]. Со временем отдельные

термосуффозионные воронки могут объединяться в линейно вытянутую депрессию (рис. 3). Конечной стадией развития подобных процессов является формирование единого циркообразного оврага (рис. 1, 4).

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ПРОВАЛОВ ПО МЕХАНИЗМУ ФОРМИРОВАНИЯ ДИССИПАТИВНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Характеристика механизма образования провала с учетом формирования над подземной полостью диссипативных геологических структур (ДГС) представлена в работах [5–7]. Если подземная полость, образовавшаяся в прочных грунтах (карстующихся скальных, ММП и т.п.), имеет “окно” (выход) к покровной толще, представленной, в частности тальми песчано-глинистыми



Рис. 4. Цирк “Е”, заполненный наледным льдом в долине руч. Улахан-Тарын.

грунтами, то указанный механизм может выглядеть следующим образом. Над полостью начинаются разгрузка напряжений и деформации грунта. Депрессионная воронка над полостью формируется вследствие взаимодействия точек массива в покровной толще, снижения давления распора в точке, и, соответственно, проявления горизонтальных и вертикальных деформаций в зависимости от степени близости точки к месту образования подземной полости (рис. 5).

Диаметр возможного провала определяется из уравнения предельного равновесия между возникшими новыми структурами в покровной тол-

ще над полостью: сводом (4) и цилиндрической структурой-столбом (5) (см. рис. 5) [5]:

$$\gamma Z_a - \sigma_{str} = \pi^2 \gamma R / 4, \quad (1)$$

где γ — среднее значение удельного веса грунтов в толще в пределах глубины Z_a ; Z_a — глубина до кровли полости; σ_{str} — структурная прочность грунта на глубине Z_a ; R — (предельный) радиус свода над отверстием в полость при исходных значениях γ , Z_a и σ_{str} .

Отсюда определяется (предельно возможный) радиус провала:

$$R = 4(Z_a - \sigma_{str} / \gamma) / \pi^2. \quad (2)$$

В соответствии с уравнением (1) выявляется диаметр возможного цилиндрического образования над полостью. Установлено, что толщина h оболочки свода и цилиндрической поверхности столба составляет $h = 0.009R$ [5–7]. В грунтах оболочки новой замкнутой структуры (при сохранении условий компрессионного сжатия) формируются напряжения, на два порядка превышающие значение распорного давления в точке массива. Изменение НДС в грунтах оболочки, главным образом, в пограничном слое над полостью, регламентирует изменение устойчивости создавшейся ДГС и характер разрушительных деформаций при образовании провала.

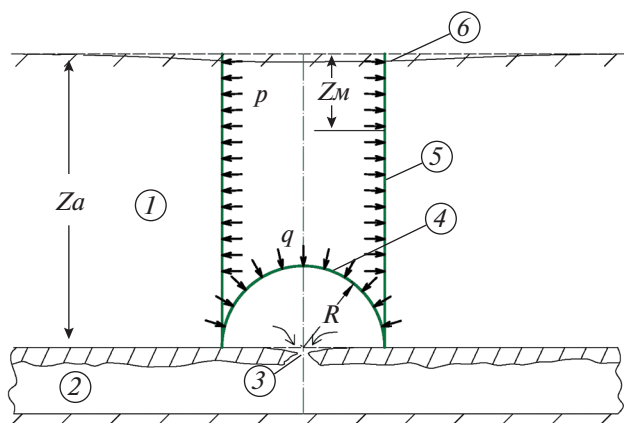


Рис. 5. Схема распределения напряжений в массиве над подземной полостью. 1 — покровная толща над полостью; 2 — пещера/полость; 3 — участок деформирования кровли пещеры и подготовки провала; 4–5 — элементы ДГС (в напряжениях): 4 — свод, 5 — столб; 6 — поверхность массива на участке подготовки провала; p и q — давление грунта на граничные поверхности (оболочки) ДГС радиусом R ; M — произвольная точка в грунтах ДГС, где давление $p = (\gamma Z_M - \sigma_{str,M}) \operatorname{tg}^2(45 - \phi_M/2)$.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ОБРАЗОВАНИЯ ПРОВАЛОВ В ММП НА УЧАСТКЕ УЛАХАН-ТАРЫН

Изучение провалов проводилось по материалам многолетних исследований Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН процессов термосуффозии и провалообразования на участке Улахан-Тарын, расположенном в долине

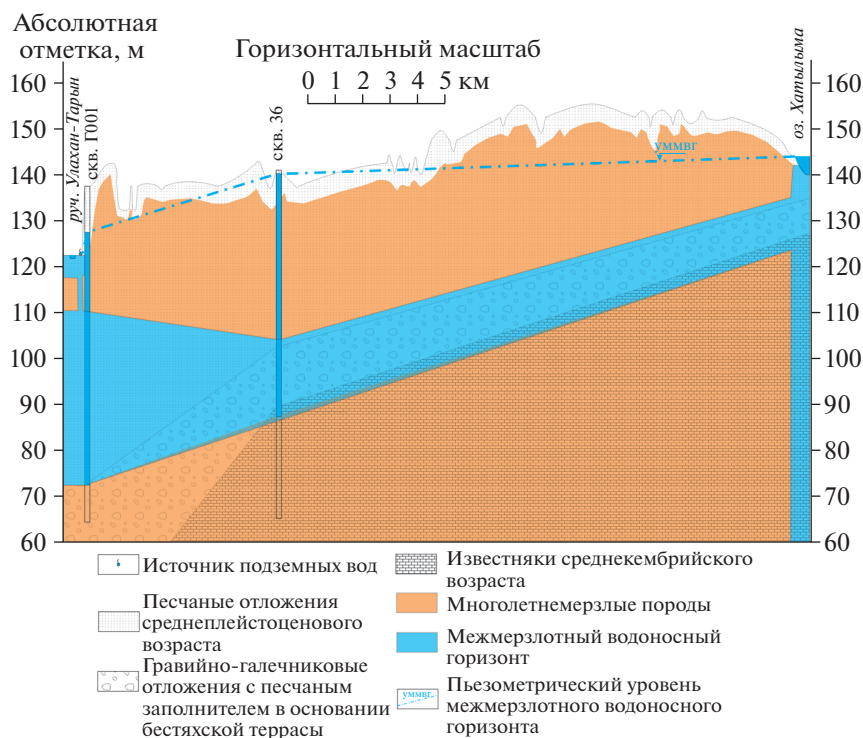


Рис. 6. Схематический мерзлотно-гидрогеологический разрез по линии между оз. Хаталыма и руч. Улахан-Тарын (скв. Г001) [3]. Голубым цветом выделен межмерзлотный водоносный горизонт (ММВГ).

руч. Улахан-Тарын в Центральной Якутии [1–4]. Выполнен комплекс геофизических исследований, включая электротомографию и георадиолокацию, с построением и анализом соответствующих электроразведочных и радиолокационных разрезов.

Установлено, что на исследуемом участке развит межмерзлотный талик, в котором происходит движение напорных подземных вод, которые разгружаются в долине руч. Улахан-Тарын.

В работе [3] исследовано развитие межмерзлотного водоносного горизонта (ММВГ) в толще ММП мощностью до 50 м, представленной песками аллювиальных отложений террасы р. Лена (рис. 6).

Древние покрытые растительностью термосуффозионные воронки и молодые провальные формы рельефа (с крутыми стенками, вплоть до вертикальных) разных диаметров выявлены в области разгрузки межмерзлотных вод, как в непосредственной близости к бровке террасы, так и на значительном удалении от нее (до 350 м).

Так, в марте 2009 г. в 30 м от бровки цирка “Е” (см. рис. 4) авторами работы [3] был обнаружен провал цилиндрической формы диаметром 2 м и глубиной около 5 м. На его вертикальных стенках имелись трещины, в верхней части обнажения песок находился в сыпучемерзлом состоянии, а

на дневной поверхности у провала наблюдалось понижение, с наклоном деревьев к осевой части. В последующие годы при активизации термосуффозионных процессов происходило образование провалов, как на выровненной поверхности террасы, так и в ранее сформировавшихся воронках [3]. По контуру провальных форм (воронок) наблюдались трещины отрыва. На дне отдельных воронок летом отмечалось скопление воды, по химическому составу аналогичной водам надмерзлотного стока.

Геофизические исследования методом электротомографии и георадиолокации позволили получить новые данные о развитии термосуффозии и подготовке провалов земной поверхности (рис. 7, 8) [2, 4].

Установлено, что в местах существующих воронок в геоэлектрическом разрезе отмечаются пониженные значения удельного электрического сопротивления ($УЭС$) пород, свидетельствующие о наличии талика, который имеет “ответвления” (рукава) вверх к воронкам 1 и 2 от кровли ММВГ.

Согласно работе [2], внутри ММВГ выделяются протяженные зоны аномально пониженных значений электрического сопротивления, которые интерпретируются как зоны повышенной пористости пород, каналы фильтрации подземных вод, возможно подобные пещерам (см. рис. 8). Отмечается, что над указанными выявленными

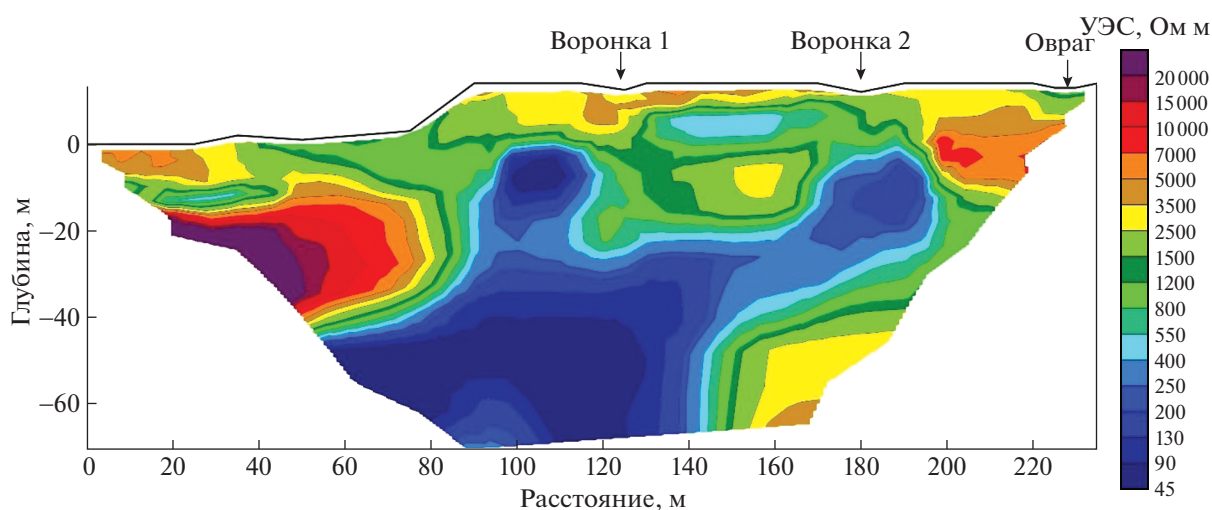


Рис. 7. Геоэлектрический разрез по профилю 1 с показом распределения величин удельного электрического сопротивления пород (УЭС) по работе [4].

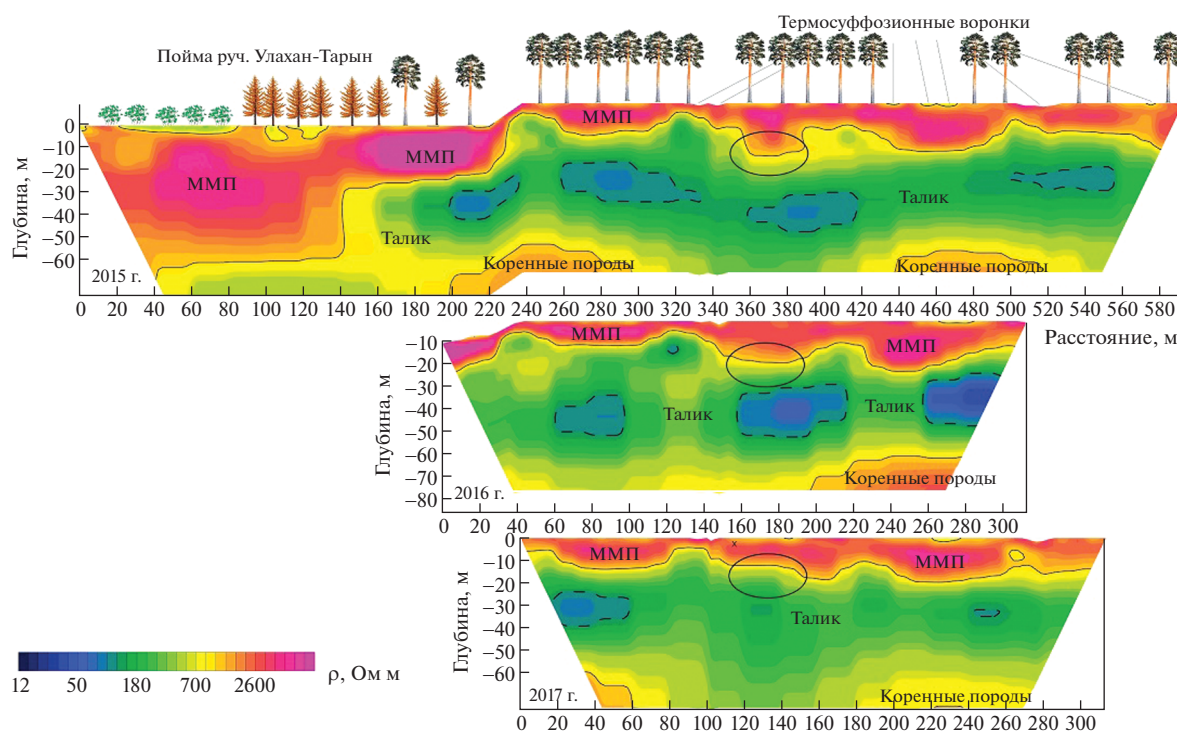


Рис. 8. Геоэлектрический разрез по профилю 6 с результатами исследований в 2015–2017 гг. [2].

зонами проявляется наибольшее количество провалов. Анализ геофизических разрезов показал, что в результате действия напорной фильтрации подземных вод происходит деградация верхнего криогенного водоупора. За 4 года мощность ММП уменьшилась на 4 м. В верхней части разреза выявлены надмерзлотные субаэральные талики, подошва которых может достигать глубины 10 м.

АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

При принятии гипотезы о подготовке и образовании провала вследствие развития термосуффозии и динамики талика, тем не менее, затруднено выявление механизма изменения НДС грунтов на участке провала: нет определенности в индикации действительной структурной прочно-

сти грунтов в кровле полости, условий снижения давления (напряжений в точках) и деформирования грунтов.

Размыв и разрушение кровли ММП происходит под действием критической величины гидравлического градиента и отепляющего влияния водного потока, благодаря которым инициируется термосуффозия. Суффозионный вынос песчаного материала напорными водами в зоне их разгрузки выражается в виде грифонов (псевдовулканов). Появление зоны разгрузки подземных вод является своеобразным триггером термосуффозии, так как в этот момент градиент напорных вод достигает критической величины. При значениях этого градиента ниже критического термосуффозия не развивается, либо существенно замедляется.

Места с “дефектом” кровли межмерзлотного водоносного горизонта (области формирования критического значения градиента напора) являются одновременно и причиной термосуффозии и создают условия ее дальнейшего развития. При встрече напорных вод с пластом льда разрушение и таяние мерзлых грунтов могут пойти в горизонтальном направлении, с расширением фронта воздействия термосуффозии.

Потоки подземных вод в межмерзлотном водоносном горизонте, как показали исследования, выносят большой объем талых песчаных грунтов, образуя фактически пещеру, в которую происходит обрушение ее свода в виде провалов. То есть провалы происходят только в разветвления указанных пещер на исследуемой территории террасы р. Лена, и наличие полости (канала) в ММВГ — необходимое условие для образования провала.

Пьезометрический уровень вод ММВГ изменяется в течение года [3] и, вероятно, в многолетнем цикле. Это отражается на интенсивности процессов термосуффозии и, соответственно, в развитии таликов при подготовке провалов. По всей видимости, интенсивность термосуффозионных процессов является одним из существенных факторов подготовки провала.

Важный момент — механизм деформирования массива грунтов над полостью. По данным геофизических исследований установлено, что со временем происходит смещение кровли ММВГ вверх, в сторону дневной поверхности террасы. Соответственно, приближаются к границе сезонного протаивания пород указанные выше “ответвления” межмерзлотного талика. В работе [1] было отмечено, что обрушение кровли ММП происходит в момент, когда в полости возникает критическая ситуация по соотношению ее ширины и высоты. При этом нет данных о формировании полости в “ответвлениях” талика. Кроме того, установлено, что на выявленных участках возможных провалов имеются субэральные надмерзлотные талики, которые могут быть индикаторами под-

готовки провала и формирования воронки, в связи с появлением зоны ослабления и разгрузки напряжений.

Геофизические исследования и мониторинг процессов на рассматриваемом участке показали, что увеличение мощности межмерзлотного талика за счет смещения его кровли в ответвлениях от ММВГ на участке подготовки провала сопровождается просадкой дневной поверхности, подобной воронке, и образованию субэрального надмерзлотного талика сверху. Развитие талика и продвижение его кровли вверх к участку будущего провала вызывают (с позиций оценки изменения НДС в массиве) снижение прочности грунта, развитие деформаций и уменьшение (разгрузка напряжений) давления в точке массива. Мерзлые песчаные грунты при повышении температуры на 5–6°C снижают свою прочность в разы [9]. Водонасыщенный грунт в талом состоянии при положительных температурах, тем более при восходящей фильтрации, может приобрести текучее состояние. То есть происходит оседание мерзлых грунтов над талыми грунтами не над точкой, а над крупной, еще в значительной степени мерзлой структурой, которая готовится как ДГС к обрушению в виде провала.

Таким образом, процесс подготовки провала — это изменение НДС не в точке, а в более крупной структуре, которая при обрушении представлена цилиндрическим объемом. Образование провала в виде обрушения правильного цилиндрического объема грунта в подземную полость указывает на обусловленность этого явления изменением НДС и формированием соответствующих геологических структур по физико-геологическим законам.

Механизм подготовки провала с образованием новых ДГС можно представить следующим образом. Над межмерзлотным таликом в локальной части кровли водоносного горизонта происходит развитие вверх канала-ответвления в результате термосуффозии и восходящей фильтрации напорных вод. Возникают деформации оттаивающего грунта и снижение давления в грунте, причем не только в точках массива (по закону Кулона-Мора), но и по контуру канала-ответвления, где формируется граничная поверхность между оттаивающим и мерзлым грунтами. По физическим законам над зоной разгрузки напряжений и, соответственно, снижения давления в точках грунта действует давление от веса столба грунта диаметром, который регулируется параметрами канала с талым грунтом. Основание столба мерзлого грунта представлено сводом над зоной разгрузки подземных вод в виде канала, заполненного талым грунтом (см. рис. 5). Диаметр провала определяется из равновесия напряжений, действующих в основании свода и столба грунта над ним. При прогнозировании провала в связи с представленным механизмом возникают пробле-

мы с определением прочности грунта в основании упомянутого столба (свода) по причине большой ее изменчивости при переходе от мерзлого состояния к талому. Кроме того, изменчива высота столба грунта — будущего провала. В какой-то мере, при изучении карстового провала возникают подобные же трудности, так как над карстующимися породами имеется зона элювия — переходная зона изменения свойств от скальных грунтов к дисперсным песчано-глинистым.

При освоении исследуемой территории крайне важна оценка опасности образования провалов. Геофизические исследования вблизи федеральной автодороги А-360-Лена, которая проходит также по песчаной надпойменной террасе р. Лена, показали, что исследуемые процессы могут создать угрозу для движения транспорта [2]. Признаками опасности возникновения провалов являются наличие или возможность формирования потоков подземных вод в меж- и надмерзлотных водоносных таликах, развитие термосуффозии и полостей. При оценке опасности для существующих или проектируемых сооружений требуется, прежде всего, оценить возможный диаметр провала. Как указано выше, на исследуемой территории выявлены провалы диаметром от первых метров до 30 м [4].

Ниже приводятся расчеты диаметра возможных провалов на основе уравнения (1), полагая, что подготовка провала происходит по механизму формирования ДГС.

В уравнении предельного состояния (1) и выражении для определения радиуса провала (2) используются три исходных параметра:

γ — среднее значение удельных весов грунтов толщи в пределах глубины Z_a ;

Z_a — глубина до основания столба грунта, смещающегося вниз;

σ_{str} — структурная прочность грунта (прочность на одноосное сжатие) на глубине Z_a .

Среднее значение удельного веса мерзлых грунтов в расчетах можно принять 20 кН/м^3 (плотность мерзлых песчаных грунтов находится в пределах $1.9\text{--}2.1 \text{ г/см}^3$ [9]).

Глубина до кровли ММВГ (см. рис. 6), составляет в среднем $Z_a \approx 30 \text{ м}$. На участках возникновения талых “ответвлений” вверх от ММВГ мощность криогенного водоупора может уменьшаться до $Z_a \approx 15 \text{ м}$.

Структурная прочность песчаных грунтов, слагающих бестяхскую террасу р. Лена на исследуемом участке, изменяется в широких пределах в зависимости от состояния, в котором находится грунт (мерзлом или талом). Мерзлые грунты имеют высокую прочность, $\sigma_{str} > 1000 \text{ кПа}$ [9]. В этом случае $\sigma_{str}/\gamma > 30$, и в соответствии с (1) формирование провала не происходит, если грунт находится в мерзлом состоянии до глубины 30 м.

При таянии мерзлого грунта его структурная прочность снижается до значений $500\text{--}580 \text{ кПа}$ (прочность грунта на промежуточном этапе перехода от мерзлого состояния к талому). Согласно уравнениям (1) и (2) при $Z_a = 30 \text{ м}$ и $\gamma = 20 \text{ кН/м}^3$, получим следующие расчетные значения $R = 0.4\text{--}2.0 \text{ м}$, или значения диаметра провала $0.8\text{--}4.0 \text{ м}$.

Как указано выше, водонасыщенные грунты в межмерзлотном талике находятся в текучем состоянии. В области разгрузки подземных вод происходят практически свободное их движение, вынос песка и образование пустот и полостей. В этом случае структурная прочность пород талика в его кровле на активных участках действия термосуффозии может достигать нулевого значения, т.е. $\sigma_{str} \approx 0 \text{ кПа}$. Расчеты по формуле (1) дадут при $Z_a = 30\text{--}35 \text{ м}$ значения радиуса провала $R = 12\text{--}14 \text{ м}$, или диаметра $24\text{--}28 \text{ м}$.

При уменьшении глубины залегания кровли талика до значения $Z_a \approx 15 \text{ м}$ на участках развития термосуффозии вверх (см. рис. 7, 8) и $\gamma = 20 \text{ кН/м}^3$ получим следующие расчетные параметры провала:

при $\sigma_{str} \approx 0 \text{ кПа}$ — $R = 6 \text{ м}$, диаметр $2R = 12 \text{ м}$;

при $\sigma_{str} \approx 280 \text{ кПа}$ — $R = 0.4 \text{ м}$, диаметр $2R \approx 1 \text{ м}$;

при $\sigma_{str} \approx 300 \text{ кПа}$ и больше — $R = 0 \text{ м}$ (провал не возникает).

То есть при приближении кровли межмерзлотного талика к дневной поверхности диаметр возможного провала снижается. Максимальное его значение не может превысить 12 м .

Таким образом, реализация механизма формирования ДГС при подготовке провала над ММВГ и использование соответствующего уравнения предельного состояния грунтов перед обрушением провала позволяют определить возможные параметры провалов. Полученные результаты расчета диаметра провалов соответствуют данным мониторинга с выявлением существующих воронок, оценкой их параметров. **По расчетным и фактическим данным диаметры провалов варьируют от первых метров до 30 м.** Следует отметить, что, согласно использованной расчетной технологии, диаметр провала не зависит от размеров водоносного талика (объема талого грунта).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Институтом мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН установлено, что на исследуемом участке развит межмерзлотный талик, в котором происходит движение напорных подземных вод. В результате процессов термосуффозии изменяется положение кровли межмерзлотного водоносного горизонта с уменьшением мощности перекрывающего его криогенного водоупора и образованием локальных ответвлений талика вверх к участкам возможного образования провала.

В соответствии с исследованиями, проведенными ИМЗ СО РАН, полагается, что под действием напорных вод ММВГ и геостатического давления происходит локальное обрушение многолетнемерзлых пород в виде провала, когда достигается критическое соотношение между шириной и высотой полости [1].

Вместе с тем имеется много признаков, указывающих на возможность реализации механизма подготовки провала, основанном на трансформации исходного НДС мерзлых грунтов над полостью и образовании новых структур (ДГС) в виде свода и столба (объема) провала.

В качестве указанных признаков можно отметить следующие:

- приуроченность проявлений провалов к выявленным межмерзлотным водоносным горизонтам;
- межмерзлотный талик сложен разуплотненными, разупрочненными грунтами с повышенной пористостью; с образованием талика в толще ММП в разы уменьшается прочность грунтов, увеличивается их пористость;
- образование и развитие талика могут представляться как локальное внешнее силовое воздействие на геологическую среду, представленную толщей ММП, которое влияет на изменение исходного НДС окружающих грунтов и проявляется в виде понижения земной поверхности над местами роста талика вверх, наклонов деревьев к оси образуемой воронки;
- формирование зон разгрузки напряжений, пустот и полостей в талике, каналов движения подземных вод к местам их разгрузки;
- отсутствие влияния надмерзлотного водоносного горизонта на развитие процессов термосуффозии в ММВГ и образование талика снизу;
- влияние напора подземных вод на интенсивность процессов термосуффозии, но не на изменение НДС при формировании провала;
- наблюдаемые проявления недавних провалов имеют, как правило, достаточно четкие *цилиндрические* очертания.

О суффозионном разрушении грунтов в местах разгрузки напорных подземных вод свидетельствуют грифоны (*называемые также псевдовулканы*). Этот механизм не имеет в данном случае отношения к закономерностям образования провалов.

Уравнения предельного состояния грунтов над подземной полостью, полученные на основе механизма подготовки провала в соответствии с физико-геологическими закономерностями преобразования исходного НДС и формирования в грунтах над полостью ДГС, позволяют определить диаметр провала по данным положения кровли талика в ММП и прочности грунтов в зависимости от степени их оттаивания.

Расчетные значения диаметра провалов (от первых метров до 30 м) соответствуют данным мониторинга, который осуществляет ИМЗ СО РАН,

на рассматриваемом участке террасы р. Лена. Причем максимальные значения диаметров соответствуют большим глубинам залегания полости и состоянию талого грунта, близкому к текучему. По данным исследований ИМЗ СО РАН, это имеет место на участках, где в ММВГ выявлены пустоты, обеспечивающие свободное течение напорных подземных вод.

Авторы выражают надежду, что дальнейшее продолжение совместных исследований процессов образования провалов в ММП позволит получить новые данные о закономерностях и механизме подготовки разрушительных деформаций грунтовых массивов в виде провалов для обеспечения безопасного освоения территорий распространения ММП.

Анализ и интерпретация данных выполнены за счет средств государственного задания и плана НИР по теме № г.р. 122022400105-9. Полевые работы выполнены при поддержке гранта РНФ № 22-17-20040.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гагарин Л.А. Динамика термосуффозионных процессов в криолитозоне (на примере Центральной Якутии): автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Якутск, 2013. 21 с.
2. Гагарин Л.А., Бажин К.И., Оленченко В.В., Огонеров В.В., Цинбай Ву. Выявление участков потенциального термосуффозионного разуплотнения грунтов вдоль федеральной автодороги А-360 "Лена" в Центральной Якутии // Криосфера Земли. 2019. Т. XXIII. № 3. С. 61–68.
3. 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.
4. 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. Т. XXI. № 5. С. 16–26.
5. Постоев Г.П. Модели механизма формирования и расчета параметров провалов земной поверхности над подземными полостями // Геоэкология. 2020. № 4. С. 36–47.
6. Постоев Г.П., Казеев А.И., Кучуков М.М. Физические законы распределения давления в геологической среде // Геоэкология. 2020. № 6. С. 22–31.
7. Постоев Г.П., Казеев А.И., Кучуков М.М. Геологические закономерности образования диссипативных геологических структур — оползневых блоков // Геоэкология. 2021. № 4. С. 33–40.
8. Хоменко В.П. Закономерности и прогноз суффозионных процессов. М.: ГЕОС, 2003. 216 с.
9. Шевелев А.С. Физико-механические характеристики многолетнемерзлых грунтов. М.: Стройиздат, 1979. 128 с.

ANALYSIS OF THE SINKHOLE FORMATION MECHANISM IN PERMAFROST ROCKS IN THE SITE OF INTRAPERMAFROST GROUNDWATER DEVELOPMENT WITH REGARDS OF DISSIPATIVE GEOLOGICAL STRUCTURES

G. P. Postoev^{a,#}, L. A. Gagarin^{b,##}, A. I. Kazeev^{a,###}, M. M. Kuchukov^{a,####}, and N. A. Pavlova^b

^a*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per., 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia*

^b*Mel'nikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, ul. Merzlotnaya, 36, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), 677010 Russia*

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

^{##}*E-mail: gagarinla@gmail.com*

^{###}*E-mail: kazeev@yandex.ru*

^{####}*E-mail: kuchukov.m@gubkin.ru*

The paper considers hazardous phenomena on the Earth's surface such as sinkholes within the Lena River floodplain terrace, the Central Yakutia, in the areas of intrapermafrost groundwater development. Possible mechanisms for the formation of a dip based on thermosuffusion and the mechanism of formation of dissipative geological structures are investigated. The materials of monitoring and geophysical works in the areas of manifestation of failures are analyzed.

Keywords: *permafrost, sinkhole, underground cavity, thermosuffusion, talik, dissipative geological structures (DGS), intrapermafrost groundwater, calculation of sinkhole parameters*

REFERENCES

1. Gagarin, L.A. *Dinamika termosuffuzionnykh protsessov v kriolitozone (na primere Tsentral'noi Yakutii)* [Dynamics of thermosuffusion processes in permafrost (on the example of Central Yakutia)]. Extended abstract Cand. Sci. (Geol.-Min.) Dissertation, Yakutsk, 2013, 21 p. (in Russian)
2. Gagarin, L.A., Bazhin, K.I., Olenchenko, V.V., Ogonerov, V.V., Tsinybay, V.V. *Vyyavleniye uchastkov potentsial'nogo termosuffuzionnogo razuplotneniya gruntov vdol' federal'noi avtodorogi A-360 "Lena" v Tsentral'noi Yakutii* [Identification of areas of potential thermal suffusion soil decompaction along the federal highway A-360 Lena in Central Yakutia]. *Kriosfera Zemli*, 2019, vol. XXIII, no. 3, pp. 61–68. (in Russian)
3. Gagarin, L.A., Semernya, A.A., Lebedeva, L.S. *Otsenka termosuffuzionnykh protsessov v tsentral'noi Yakutii na primere uchastka Ulakhan-Taryn* [Assessment of thermosuffusion processes in Central Yakutia on the example of the Ulakhan-Taryn site]. *Geokologiya*, 2016, no. 3, pp. 252–262. (in Russian)
4. Olenchenko, V.V., Gagarin, L.A., Khristoforov, I.I., Kolesnikov, A.B., Efremov, V.S. *Stroyeniye uchastka razvitiya termosuffuzionnykh protsessov v predelakh bestyakhskoi terrasy reki Leny po geofizicheskim dannym* [The structure of the site for the development of thermosuffusion processes within the Bestyakhskaya terrace of the Lena River according to geophysical data]. *Kriosfera Zemli*, 2017, vol. XXI, no. 5, pp. 16–26. (in Russian)
5. Postoev, G.P. *Modeli mekhanizma formirovaniya i rascheta parametrov provalov zemnoi poverkhnosti nad podzemnymi polostyami* [Models of the mechanism for the formation and calculation of the parameters of the sinkhole of the Earth's surface above underground cavities]. *Geokologiya*, 2020, no. 4, pp. 36–47. (in Russian)
6. Postoev, G.P., Kazeev, A.I., Kuchukov, M.M. *Fizicheskiye zakony raspredeleniya davleniya v geologicheskoi srede* [Physical laws of pressure distribution in the geological environment]. *Geokologiya*, 2020, no. 6, pp. 22–31. (in Russian)
7. Postoev, G.P., Kazeev, A.I., Kuchukov, M.M. *Geologicheskie zakonomernosti obrazovaniya dissipativnykh geologicheskikh struktur – opolznevykh blokov* [Geological patterns of formation of dissipative geological structures – landslide blocks]. *Geokologiya*, 2021, no. 4, pp. 33–40. (in Russian)
8. Khomenko, V.P. *Zakonomernosti i prognoz suffuzionnykh protsessov* [Patterns and forecast of suffusion processes]. Moscow, GEOS Publ., 2003, 216 p. (in Russian)
9. Shevelev, A.S. *Fiziko-mekhanicheskie kharakteristiki mnogoletnemerzlykh gruntov* [Physico-mechanical characteristics of permafrost soils]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1979, 128 p. (in Russian)