

УДК 551.4+502.5:502.6

ТЕХНОГЕННЫЕ КАМЕННЫЕ ГЛЕТЧЕРЫ В РАЙОНАХ ОСВОЕНИЯ КОРЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СЕВЕРО-ВОСТОКА

А. А. Галанин¹, О. В. Моторов², М. Н. Замощ²

¹*Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт ДВО РАН, г. Магадан*
E-mail: lichen@neisri.magadan.ru

²*Открытое акционерное общество «ВНИИ-1», г. Магадан*
E-mail: vnii-1@online.magadan.su

Рассматриваются строение, морфология и морфодинамика техногенных отвалов золото-серебряного месторождения Кубака (Магаданская область). Приводятся данные 3-летнего геотермического мониторинга по системе скважин, а также результаты наблюдения разнообразных термических явлений, развивающихся в телах отвалов. Показано, что при промерзании отвалов в условиях перигляциальной зоны морфогенеза в пористой грубообломочной массе происходит активное накопление ледяного цемента. Проведенные расчеты показали, что при полном насыщении льдом давление в основаниях некоторых отвалов через 50–100 лет возрастет до 1,5 бар. В этом случае в них возможны пластические деформации и течение со скоростью более 0,5 м/год. Прогнозируемые образования по морфодинамическим свойствам будут близки к распространенным в регионе присклоновым каменным глетчерам.

Ключевые слова: техногенные каменные глетчеры, промерзание и динамика отвалов, перигляциальный морфогенез, геотермический мониторинг отвалов.

ВВЕДЕНИЕ

При освоении крупных коренных месторождений в условиях горной криолитозоны могут возникать динамически активные образования – техногенные каменные глетчеры, формирование которых связано с промерзанием крупноглыбовых отвалов большой мощности. Широкое распространение техногенных глетчеров, вызвавшее негативный экономический эффект, известно из опыта разработки месторождений апатитового сырья в Хибинах. На территории Северо-Востока в сходных морфоклиматических и геокриологических условиях формируются отвалы крупного золото-серебряного месторождения Кубака. На основе действующих нормативов и технологий рекультивации нарушенных земель считается, что промерзание техногенных отвалов способствует их стабилизации, причем «промерзшими» рассматриваются отвалы со среднегодовыми температурами ниже $-3...-4^{\circ}\text{C}$. К настоящему времени основная часть отвалов месторождения имеет статус рекультивированных земель. Однако ряд геотермических и гидрологических эффектов, наблюдаемых при промерзании некоторых крупных тел, указывают, что они еще не стабилизировались. В связи с этим в настоящей статье предпринята попытка рассмотреть строение и температурный режим отвалов на основе результатов их трехлетнего геотермического мониторинга по скважинам, сравнить техногенные отвалы с близкими по морфологии природными каменными глетчерами, охарактеризовать механизм динамики тех-

ногенных глетчеров и осуществить предварительный их прогноз на ближайшее время. Используемые в статье материалы собраны авторами в ходе наблюдений на месторождении Кубака с 1993 по 2003 г.

ПРИРОДНЫЕ КАМЕННЫЕ ГЛЕТЧЕРЫ

Каменные глетчеры – полигенетические склоновые образования, формирующиеся в горных районах криолитозоны. На Северо-Востоке России они известны в ряде горных районов (Галанин, Глушкова, 2004; Галанин, 2005). Каменные глетчеры образуют языкообразные, лопастевидные, террасовидные и сложносоставные формы (рис. 1, *a-v*), достигающие размеров от нескольких десятков метров до первых километров и мощности до 60–70 м. Сложены эти образования преимущественно грубообломочным материалом, сцементированным конжеляционным льдом. Содержание льда в отдельных участках глетчеров превышает 50%. В составе мерзлой части нередко присутствуют жилы инъекционных льдов, ледяные ядра и линзы. Первичная слоистость каменных глетчеров, отражающая процессы сезонного намораживания на льдистую поверхность нового ледово-грунтового слоя, нередко деформирована в результате пластического течения под собственным давлением. Поверхностные признаки течения в виде радиальных валов и ложбин наблюдаются у глетчеров, мощность которых превышает 15–20 м.

Каменные глетчеры парагенетически входят в состав нивально-гляциального и перигляциаль-

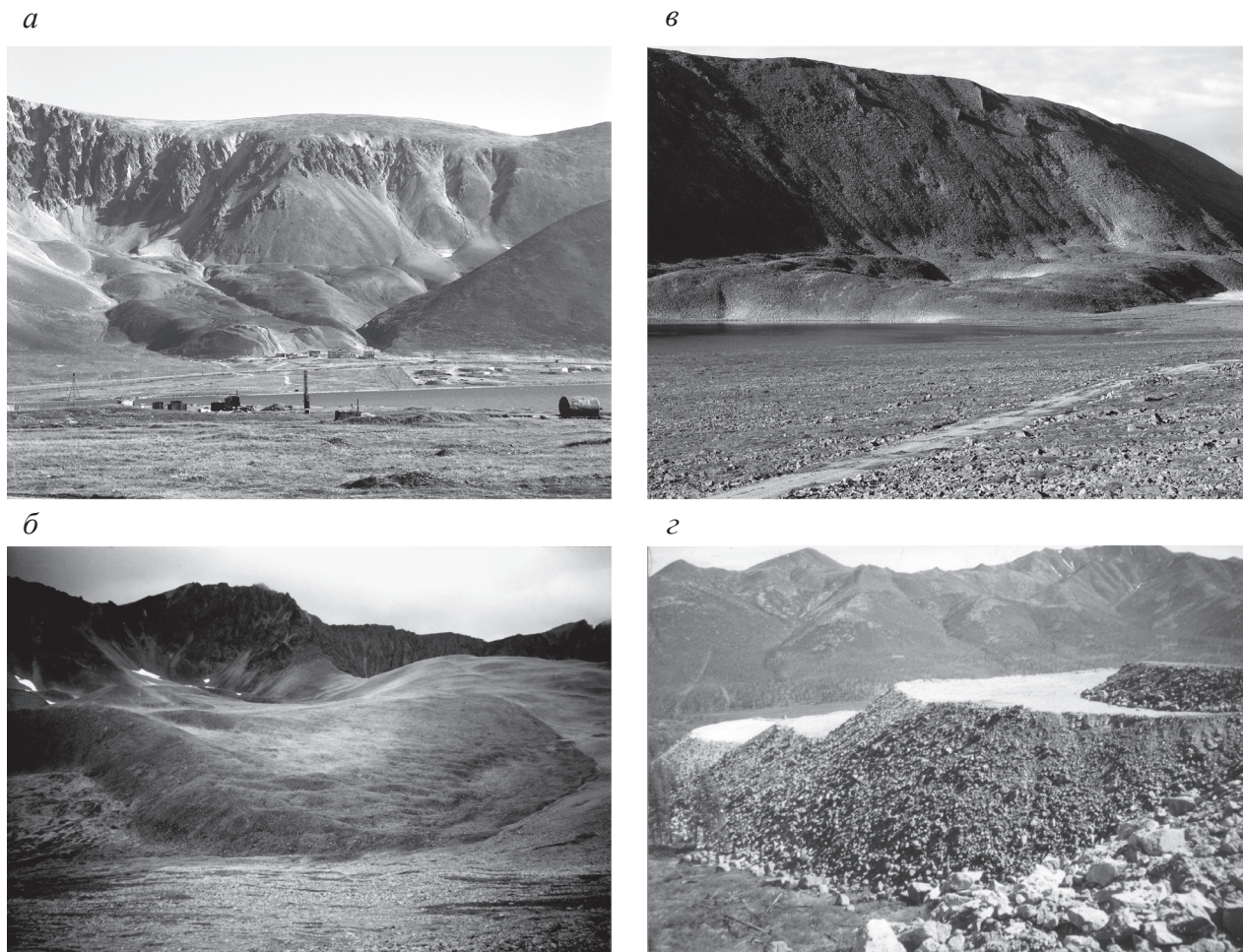


Рис. 1. Разновидности присклоновых каменных глетчеров Провиденского горного массива и техногенный отвал месторождения Кубака: а – каровый; б – каровый языковидный (фото С. Д. Шведова); в – присклоновый лопастевидный; г – террасированный отвал на месторождении Кубака, Омолонский массив

Fig. 1. Different types of slope rock glaciers in the Providenia Mountains and an industrial dump in the Kubaka Lode area: а – a cirque; б – a tongue-shaped cirque (picture by S. D. Shvedov); в – a slope lobate glacier; г – a terrace-shaped dump at Kubaka Lode, the Omolon Mountains

ного рядов склоновых образований. Они имеют множество фациальных разновидностей, которые объединяются в две основные морфогенетические группы. К первой относятся каменные глетчеры, связанные с настоящими ледниками и формирующиеся из них в ходе дегляциации (хвостовые, остаточные, приледниковые). Вторую, более обширную группу составляют присклоновые каменные глетчеры, формирующиеся самостоятельно в благоприятных геоморфологических и геофизиологических условиях.

Каменные глетчеры в настоящее время являются одним из наиболее динамически активных типов гляциально-криогенных склоновых процессов голоценового морфолитогеоза в перигляциальной зоне северо-востока Азии. Скорость их течения на Северо-Востоке России варьирует от нескольких сантиметров до 1–2 м/год (Галанин, Глушкова, 2004; Галанин, 2005). Движение каменных глетчеров при определенных условиях принимает катастрофический характер, в виде быстрого смещения громадных масс ледово-каменного материала. В этом случае они могут пред-

ставлять серьезную угрозу для человека и техногенных сооружений. Так, зафиксировано несколько аномальных сорванных с ложа и деформированных каменных глетчеров в эпицентральной зоне известного Ямского землетрясения 1851 г. (п-ов Кони, Приохоть). Крупные озерные плотины позднеголоценового возраста, связанные с обрушением стенок ледниковых каров и катастрофическим глыбовым сползанием тел каменных глетчеров, отмечены рядом с пос. Провидения в южной части Чукотского полуострова. По динамической активности выделяются активные, неактивные и отмершие каменные глетчеры. Последние представляют собой собственно отложения каменных глетчеров, лед-цемент у которых практически полностью вытаял, а исходная форма постепенно преобразовывается под воздействием постгенетических явлений.

В некоторых горных районах криолитозоны известны техногенные каменные глетчеры, образовавшиеся из крупноглыбовых отвалов при разработке коренных месторождений. Проходка горных выработок, строительство гидротехничес-

ких сооружений, дорог приводят к накоплению на горных склонах и на дне долин больших масс материала, нередко грубообломочного состава (см. рис. 1, 2). Эти скопления в условиях криолитозоны, определенных гидрологических и погодных факторов могут насыщаться льдом, приобретать вязкопластические свойства и приходиться в движение (Горбунов, 1988). В дальнейшем техногенное образование начинает приобретать форму каменного глетчера.

ТЕХНОГЕННЫЕ КАМЕННЫЕ ГЛЕТЧЕРЫ ХИБИН

Наиболее показательным примером техногенных каменных глетчеров является их массовое образование в Хибинах на плато Расвумчорр в связи с внедрением новых технологий дробления при разработке крупного месторождения апатитового сырья (Горбунов, 1988). В морфоклиматическом отношении данный район приурочен к перигляциальной зоне и криолитозоне. Многолетняя мерзлота распространена в виде островов преимущественно на северных склонах. Плато Расвумчорр было одним из центров последнего позднеплейстоценового оледенения, на отдельных участках здесь сохранились системы ледниковых каров и троговых долин. В некоторых карах имеются небольшие присклоновые леднички и фирники.

При апробации новой технологии горнопроходческих работ на руднике «Центральный» в начале 70-х гг. было получено огромное количество грубообломочного материала, в том числе и «негабаритов». В начале 1970 г. здесь начинается планирование подземной разработки месторождений, характеризующихся сравнительно низким содержанием апатита в руде. Обеспечить приемлемую экономичность горных работ в таких условиях могла только принципиально новая технология горных работ. В качестве таковой комбинатом «Апатит» совместно с оборонными НИИ разрабатывалась технология отбойки руды ядерными взрывами. Соответствующие эксперименты, проведенные в 1972 и 1984 г., получили кодовые названия «Днепр-1» и «Днепр-2» (Барабанов, Калинина, 2004).

При проектировании этих экспериментов использовался опыт комбината по этажному принудительному обрушению покрывающих пород в ходе отработки рудных тел. Была принята во внимание и способность апатит-нефелиновой породы хорошо дробиться в условиях сжатия вне зависимости от способа дробления. Ядерный заряд размещался в боковых породах за намечаемым контуром отбойки, который оконтуривался щелями-экранами с противоположной от зарядных камер стороны и нижней подсечкой. От зарядных камер во вмещающие породы отходили горизонтальные выработки, в конце которых размещались камеры для захоронения отходов ядерного взрыва, а во всех выходящих на поверхность выработках устанавливались специальные перемычки для предотвращения выбросов (Там же).

В обоих экспериментах рудный блок был отбит в намечаемых контурах, что составило соответственно 121 и 448 тыс. м³. Крупность дробления практически не отличалась от таковой при дроблении традиционным способом. Выпуск дробленной массы производился в первом случае скреперными лебедками мощностью 100 кВт и производительностью 350 т в смену, во втором – конвейером КЛТ-120 производительностью 3500 т в смену. При этом объем горных выработок на 1000 т добытой руды оказался в несколько раз меньше, чем при отработке этажным принудительным обрушением (Барабанов, Калинина, 2004).

Благодаря проведенным мероприятиям мощность Саамского карьера по добыче руды возросла на 1 млн т и достигла проектной величины 3 млн т в год. Комбинат «Апатит» в 1974 г. впервые дал более 14 млн т апатитового концентрата. Иными словами, эксперименты подтвердили экономическую целесообразность новой технологии для месторождений с низким содержанием апатита. Это послужило основанием для разработки аналогичного проекта для месторождения Партомчорр. Последний проект не был осуществлен вследствие принятия в 1996 г. Договора о всеобщем запрещении ядерных испытаний. Наблюдения, ведущиеся со времени проведения экспериментов по настоящий день самыми различными организациями, включая зарубежные, свидетельствуют об отсутствии радиационного загрязнения природной среды. Длительное время информация о ядерных взрывах на руднике, естественно, была весьма секретной. В ходе внедрения новых технологий дробления породы резко возросло производство отвалов пустых пород, которые круглогодично отсыпались на окружающие карьеры склоны, что вызвало формирование техногенных каменных глетчеров.

А. П. Горбунов описал в монографии (1988) наблюдаемое им в 1974 г. явление следующим образом. В ходе подготовки крупного рудника для добычи апатитового сырья отсыпка отвалов пустой породы велась круглогодично и преимущественно на склонах северных экспозиций, где распространена многолетняя мерзлота островного типа. В зимнее время крупноглыбовый материал в ходе транспортировки и отсыпки интенсивно перемешивался на склонах со снегом. В дальнейшем эти участки отвалов превратились в ледово-каменную массу. По мере нарастания отвалов давление в них увеличилось, и ледово-каменная масса поползла вниз. Дальнейшая отсыпка пород на горные склоны была запрещена, под угрозой срыва оказались планы развития нового рудника. Создавшиеся обстоятельства привели к необходимости срочно организовать научные исследования непредвиденного явления, поскольку по инженерному проекту промерзание отвалов, наоборот, являлось их главным стабилизирующим фактором.

Однако по достижении определенной мощности и спустя примерно один год после отсыпки отвалы начали двигаться. Временами скорость достигала 1 м в сутки. Площадка стала проседать, и заезд на нее тяжелых самосвалов оказался невозможен по правилам техники безопасности. Руководство рудника решило расширить площади складирования пустой породы, и через несколько лет все удобные участки склонов оказались заняты отвалами, резервы складирования были полностью исчерпаны. На значительной части новых отвалов проявились те же динамические явления.

В ходе специальных исследований, цель которых – изучение строения и динамики отвалов (Горбунов, 1988), выявлены следующие характеристики техногенного каменного глетчера (67°38,5' с. ш., 33°56,2' в. д.). Средние размеры обломков 18 см, максимальные – до 1 м и более. Объемная льдистость 50%, в некоторых случаях – до 70%. Фирновый снег и лед заполняли пустоты между обломками, в толще присутствовали линзы льда мощностью до 1,5–2 м. При льдистости более 30% обломки горных пород переходят во взвешенное состояние. Именно это приводит к резкому качественному изменению характера деформаций ледово-каменной массы: она подвергается вязкопластическому течению при температуре $-1,2^{\circ}\text{C}$ и достижении давления $1,6\text{ кг/см}^2$.

Отвал, сформированный на крутом ($30\text{--}40^{\circ}$) склоне, сползая вниз, достиг более пологого ($15\text{--}20^{\circ}$) и стал приобретать форму каменного глетчера – появились поперечные дугообразные валы, ложбины, фронтальный откос и др. Двигаясь дальше, техногенный глетчер достиг нового перегиба склона, где крутизна поверхности снова возросла до $20\text{--}30^{\circ}$. Скорость каменного глетчера увеличилась, произошел разрыв его мерзлого тела, и масса объемом около 4 млн м^3 обрушилась в виде оползня-потока в долину небольшой горной речки (Горбунов, 1988).

Как отмечает А. П. Горбунов (1988), посетивший повторно рудник в 1977 г., спустя 3 года после окончания отсыпки, часть охарактеризованного каменного глетчера, двигаясь далее по склону, оторвалась в виде своеобразного оползня-сея и пронеслась на 2,5 км вниз по боковой долине в принимающую долину р. Коашва. В долине этой реки, на участке протяженностью около 1,5 км, в зоне разгрузки селевой массы сформировался специфический рельеф. В верхней части аккумулятивного тела были четко выражены валы и ложбины, дугообразно изогнутые по ходу движения, имеющие высоту до нескольких метров, а длину до нескольких десятков метров. В нижней части потока валы распадались на отдельные бугры. Здесь отсутствовали типичные для сея боковые валы и другие признаки. Исследователь считает, что часть материала сея переносилась во взвешенном состоянии, а часть перекачивалась в виде мерзлых глыб. Окончательно растаяв, ледово-каменные глыбы превратились в бугры фронтальной части аккумулятивного тела.

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОГЕННЫЕ КРИОГЕННО-СКЛОНОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ НА МЕСТОРОЖДЕНИИ КУБАКА

Кубака – одно из крупных коренных золото-серебряных месторождений, расположенное в Северо-Эвенском районе Магаданской области ($63^{\circ}41,2'$ с. ш., $159^{\circ}59,6'$ в. д.), в бассейне нижнего течения р. Малая Авландя, правого притока р. Омолон. Рельеф в районе месторождения среднегорный, максимальные отметки 800–1000 м, минимальные – 600–650 м. Крутизна склонов участка месторождения варьирует от 10 до 30°. Зональная морфоскульптура представлена пролювиально-делювиальными и солифлюкционными шлейфами, террасовалами. В верхнем поясе имеются осыпные, курумные и десерпционные участки склонов. В верховьях р. Кубака встречаются каровые каменные глетчеры. Присклоновые каменные глетчеры обнаружены в 40 км к северо-западу в бассейне р. Биркачан, а также в горах Гряды Захаренко.

Климат в районе месторождения резкоконтинентальный. Среднегодовая температура воздуха -12°C . Минимальная среднемесячная температура -35°C (декабрь – январь). Минимальная наблюдаемая температура -56°C . Летняя среднемесячная температура от $+6$ до $+15^{\circ}\text{C}$, иногда $+28^{\circ}\text{C}$. Максимальное годовое количество осадков составляет 754 мм. Устойчивый снежный покров устанавливается в конце октября. Мощность снежного покрова на безлесных водоразделах достигает 0,6–1,0 м, в долинах – до 3,5 м. Таяние снегов начинается в середине мая, а завершается в середине июня и сопровождается сильными паводками. Среднее число дней в году со снежным покровом – 240.

Растительность на склонах образована преимущественно лиственничниками в разном сочетании с кедровым стлаником, ольхой, кустарниковыми березками. В верхнем поясе гор фрагментарно распространены каменистые, лишайниково-кустарничковые тундры, каменистые развалы с сообществами накипных лишайников.

В настоящее время значительная часть склонов на участке месторождения претерпела изменения, в ходе которых был сформирован техногенный ландшафт. Его основными геоморфологическими элементами являются отвалы, карьер, дамбы и техногенные озера (хвостохранилище), насыпи и полки автодорог, планировочные (выполоченные) поверхности техногенных площадок.

Строение отвалов. Общая масса пустых пород, накопленных горнорудным предприятием на месторождении Кубака, составляет не менее 30 млн т (рис. 2). Пустые породы, складированные в отвалы, представлены смесью разновозрастных вулканогенно-осадочных и интрузивных: средне- и позднедевонских туфов риодацитов, игнимбритов, туфопесчаников и туфопесчаников; средне- и позднедевонских трахириолитов, риодацитов и андезитов.



Рис. 2. Террасированный рельеф отвалов после отработки месторождения Кубака, Магаданская область

Fig. 2. Post-mining terraced dumps in the Kubaka Lode area, Magadan Region

Сформированные отвалы представляют собой уплощенные террасированные поверхности, сложенные крупноглыбовыми фациями коренных пород. Мощность отдельных отвалов около фронтального откоса достигает 59 м. По масштабу отвалы соответствуют элементам рельефа ранга мезоморфоскульптуры. Они формируются вдоль топографических контуров бортов речных долин сверху вниз по мере развития карьера в виде последовательных ярусов, у подножия каждого из которых образуется горизонтальная берма с минимальной шириной 12 м и максимально допустимым уклоном 0,01.

После отработки месторождения морфометрические характеристики отвалов двух основных полигонов – «Восточного» и «Западного» – характеризуются следующими параметрами: преобладающие элементы рельефа – плато, откосы; преобладающая высота яруса 14 м; максимальная высота яруса 59 м; максимальная ширина бермы (террасы) 180 м; средняя ширина бермы (террасы) 115 м; максимальная площадь по нижнему основанию 14 га; средняя площадь по нижнему основанию 4 га; угол откоса яруса/естественного откоса 37°; максимальный результирующий угол отвалов 27°.

Отложения, подстилающие отвалы, имеют крупнообломочный состав и содержат обломки коренных пород до 2 м с заполнителем, представленным неоднородными смесями фракций песка, дресвы, гравия. Для нижней части разреза отвалов характерно преобладание глыбовых разностей, в том числе размером более 2 м, с минимальным количеством или отсутствием заполнителя, что обусловлено процессами дезинтеграции пород при их гравитационном перемещении от

бровки вниз по откосам отвалов. Мощность формируемого крупноглыбового слоя в подошве отвалов около 3 м. За счет укатывания и бульдозерной планировки бермы представляют собой плоские, близкие к горизонтальным, сильно уплотненные, слабопроницаемые поверхности, сложенные измельченными до дресвяно-супесчаной фракции коренными породами. Плотность пород верхнего слоя достигает 1,9–2,4 г/см³, мощность 1,0–1,5 м.

Геокриологические и гидрогеологические особенности отвалов. В рассматриваемом районе ненарушенные рыхлые и коренные горные породы находятся в многолетнемерзлом состоянии с температурой от -1,5 до -5,4°С и характеризуются суммарной льдистостью 0,31–0,88% (Моторов и др., 2005). Средняя мощность многолетнемерзлых пород составляет около 200 м. На участке месторождения Кубака развиты природные и техногенные над- и межмерзлотные талики, криопэги (локальные участки массива пород с незамерзшей минерализованной водой и отрицательной температурой).

Высокая поглощающая способность поверхности отвалов с коэффициентом стока не более 0,1–0,3, определяемая гранулометрическим составом пород и отсутствием почвенно-растительного покрова, обуславливает практически полную инфильтрацию воды в массивы отвалов. Значительная часть воды с поверхности и с приповерхностных горизонтов отвалов в летний период испаряется под действием высоких градиентов температуры и влажности. Гравитационное перемещение оставшейся влаги сопровождается формированием стыковой влаги, кратковременным частичным и/или полным заполнением порового про-

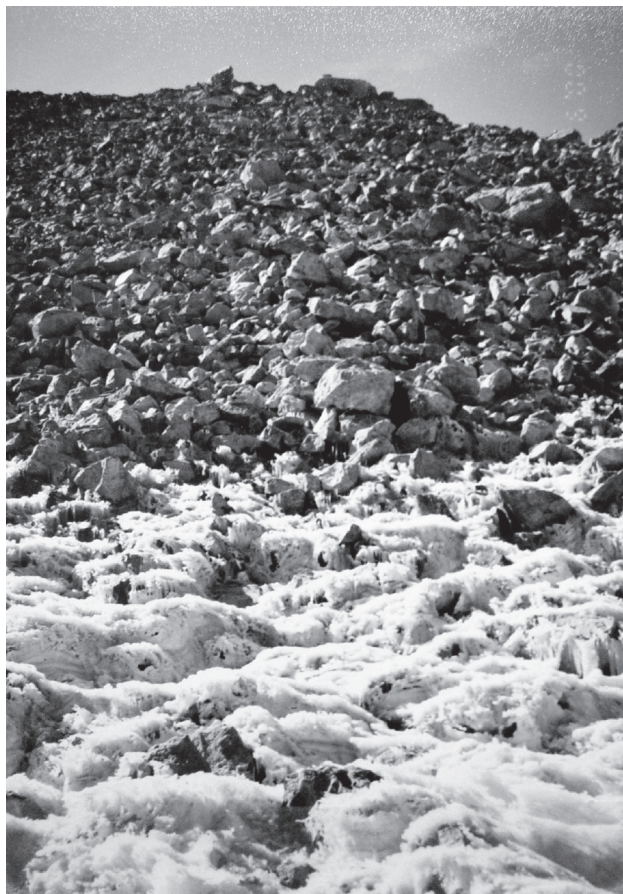
странства. В зимний период при промерзании пород отвалов содержащаяся в них вода замерзает. Расчетная температура замерзания воды с максимальной из зафиксированных за период наблюдений минерализацией 3,5–4,0 г/л составляет около $-0,2^{\circ}\text{C}$ (Моторов и др., 2005).

За 1997–2000 гг. дренаж воды из сформированных отвалов пустых пород не отмечен, несмотря на значительный водосбор отвальных полигонов. По ряду признаков предполагается, что большая часть осадков, попадающих внутрь отвалов, аккумулируется в виде разных типов льда, который постепенно заполняет полости между обломками. Процесс насыщения льдом, цементирующим рыхлый обломочный материал, выражается образованием пояса натеков льда и изморози в нижних частях фронтальных склонов наиболее крупных отвалов. Высота пояса достигает 5–6 м от подножий отвалов. В летний период и особенно в жаркую погоду на нижних участках фронтальных откосов крупных отвалов наблюда-

ются холодные воздушные потоки с температурой ниже -10°C . В результате их действия при смешении с теплыми струями воздуха на поверхности обломков, а также на близлежащих к краю откоса деревьях и кустарниках формируется пояс инея и зона угнетенной вегетации (рис. 3). В 2002 г. ширина этой зоны у откоса отвала 670 полигона «Восточный» составляла около 100 м. Причем в начале августа, в разгар вегетационного сезона, в примыкающей к фронту отвала полосе шириной 20–30 м еще только наблюдалось цветение кустарниковых ив. Таким образом, охлаждающее действие некоторых отвалов на примыкающих к их фронту узких участках проявилось в сокращении сроков вегетации на 15–20 дней и формировании микроклиматов, характерных для арктического пояса.

Геотермический мониторинг отвалов. Эталонные отвалы пустых пород были оборудованы поперечным (отвал 796) и продольным (отвал 790) профилями геотермических скважин, позволяющими оценить параметры и динамику тем-

а



б



в



Рис. 3. Формирование ледяного цемента в нижних частях отвалов и криогенные явления в ходе промерзания на месторождении Кубака, Магаданская область: а – выступающий на поверхность слой ледяной изморози в нижней части фронтального откоса; б – пояс угнетенной вегетации в зоне влияния холодных воздушных потоков, выходящих из-под отвалов; в – формирование ледово-каменного горизонта в нижней части фронтального откоса отвала 670 полигона «Восточный»

Fig. 3. Development of cementing ice at the dump bottom and freezing processes in the Kubaka Lode area, Magadan Region: а – emerging hoarfrost at the bottom of the dump front slope; б – a stunted vegetation belt affected by cold air flows coming from beneath the dumps; в – a developing ice-rock layer at the bottom of the front slope of dump 670 in the Vostochny mining area

пературного режима в различных морфологических частях отвалов в ходе их посттехногенного промерзания (Моторов и др., 2005).

Скважины пройдены на всю мощность отвальных отложений и заглублены в подстилающую поверхность. Датчики температуры (термометры сопротивления) установлены на гирляндах (термокосах) с интервалами от 1 м в верхних и средних частях разреза до 4 м в нижних. Замеры показаний

датчиков проводились 1 раз в декаду каждого месяца начиная с конца мая 2000 г. Для составления единой масштабной модели определенные на различных глубинах (с интервалами датчиков 2–4 м) температуры после введения необходимых поправок интерполировались с шагом 1 м. Результаты наблюдений с мая 2000 по декабрь 2003 г. представлялись в виде термоизоплет, помесечных температурных срезов и др. (рис. 4).

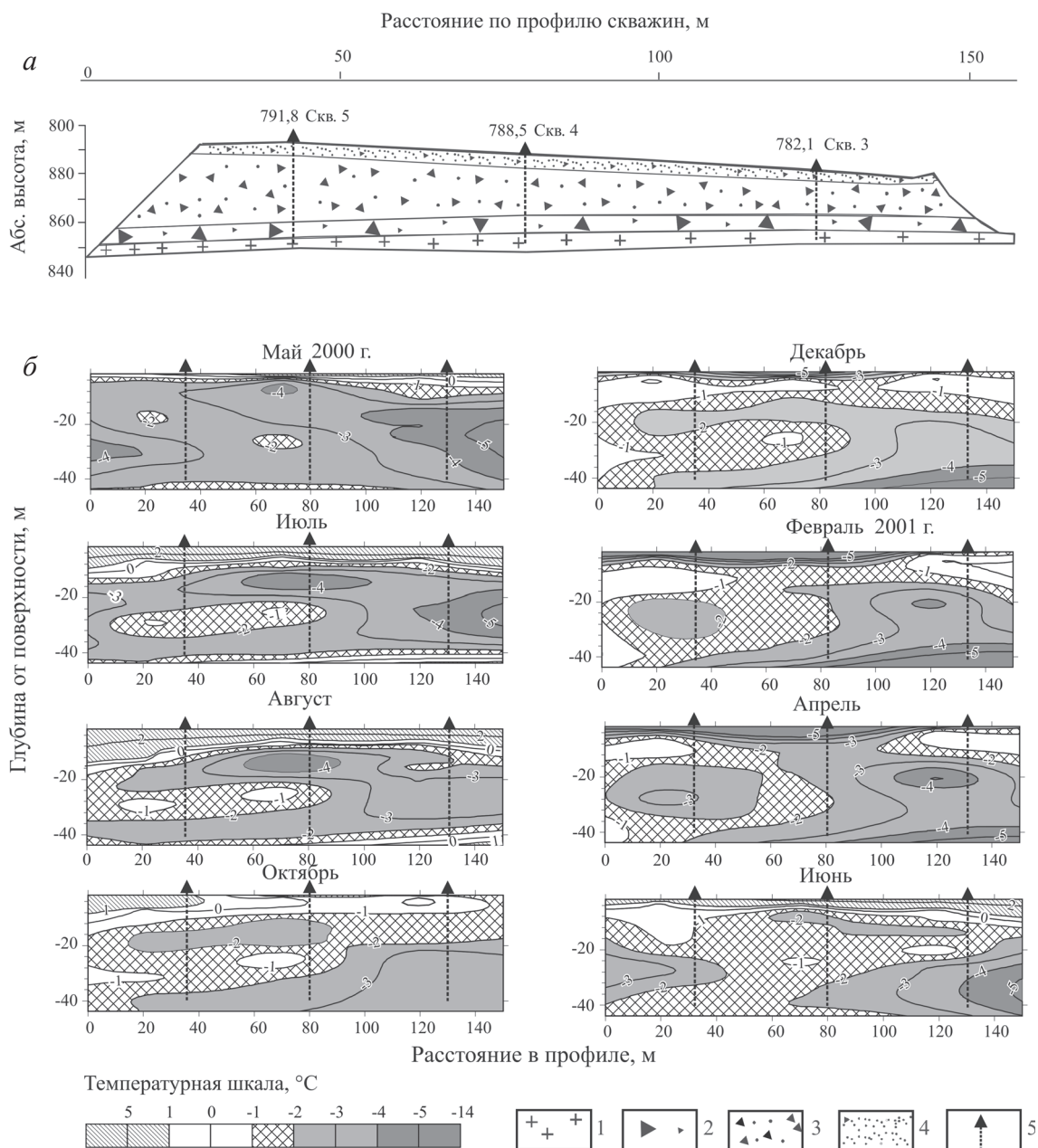


Рис. 4. Литологический разрез отвала 790 полигона «Восточный» (а) и температурные графики по результатам ежемесячных наблюдений с мая 2000 г. по июнь 2001 г. в профиле геотермических скважин 5, 4 и 3 (б): 1 – рhyодациты и риолиты; 2–4 – техногенные отложения отвала: 2 – крупноглыбовый горизонт основания отвала; 3 – щебнеглыбовый рыхлый горизонт; 4 – щебнеглыбовый уплотненный горизонт; 5 – местоположения скважин

Fig. 4. A lithologic section of dump 790 in the Vostochny mining area (a), and temperature graphs underlain by monthly records obtained since May 2000 through June 2001 for geothermal drill holes 5, 4 and 3 (b): 1 – rhyodacite and rhyolite bedrocks; 2–4 – industrial dump rocks: 2 – psephitic rocks at the dump bottom, 3 – loose debris rocks and boulders, 4 – compact debris rocks and boulders; 5 – drill holes

Кроме геотермических исследований по скважинам, в течение летнего периода (июнь и июль) проводились маршрутные наблюдения за температурно-влажностным состоянием порового воздуха и приземного слоя атмосферы у подножия конечных отвалов на полигоне «Восточный» и «Западный». Температуры замеряли с использованием психрометра Ассмана на высоте 0,5–1,0 м от поверхности земли и в воздушных полостях пород у подножия отвалов.

В результате мониторинга выявлены температурные изменения на разных горизонтах отвалов, определены глубины сезонного оттаивания и промерзания. На графиках термоизоплет хорошо интерпретируются сезонные аномалии относительно переохлажденных пород, формирующиеся и за счет охлаждения сверху, и за счет поступления холодного воздуха с фронтальной части (откоса) отвалов.

Средняя температура толщи отложений наблюдаемых отвалов за период развития и существования сезонно-талого слоя (май – октябрь) составляет от $-0,3$ до $-1,9^{\circ}\text{C}$. Для отвала 796 минимальная температура характерна для центральной части, максимальная – для склона южной экспозиции, для отвала 790 – минимальная для склона северо-западной экспозиции и центральной части, максимальная для склона северо-восточной экспозиции. Аналогичная закономерность свойственна и средним температурам мерзлых пород, изменяющимся в зависимости от геоморфологической обстановки от $-1,0$ до $-2,9^{\circ}\text{C}$. Минимальные за период наблюдений температуры в отвалах пустых пород отмечены для скв. 1 ($-6,1^{\circ}\text{C}$ на глубине 9 м) и для скв. 3 ($-5,0^{\circ}\text{C}$ на глубине 21 м).

Средняя температура пород на подошве отвалов составляет $-2,6^{\circ}\text{C}$ при абсолютном минимуме

$-7,4^{\circ}\text{C}$ на склоне северо-восточной экспозиции отвала 790. Максимальная за год мощность слоя пород (от поверхности) с температурой до -1°C , при которой будет происходить замерзание поровой воды с фактической минерализацией 4 г/л и выше (до 19 г/л), составляет для отвала 796 в среднем 8 м (53% от общего объема отвала), для отвала 790 – в среднем 10 м (30% от общего объема отвала). Остальная часть пород отвалов, соответственно для рассматриваемых отвалов 47 и 70%, находится при температурах ниже -1°C .

Полученные результаты свидетельствуют о формировании температурного и геокриологического режима отложений отвалов пустых пород под активным влиянием процессов конвективного тепло- и массообмена.

Роль основного агента конвективного тепло-, массообмена принадлежит проникающему в отвалы атмосферному воздуху, который в зависимости от времени года охлаждает (зимой) и нагревает (летом) отложения отвалов. В соответствии с существующими представлениями движение воздуха происходит по поровому пространству пород под влиянием двух основных факторов:

- градиентов температуры и влажности между поровым и атмосферным воздухом;
- динамики атмосферного давления.

Скорость перемещения воздуха в поровом пространстве и на выходах в атмосферу зависит от абсолютных значений градиентов и составляет по натурным оценкам в летний период (конец июля) на уровне подошвы отвала 670 не менее 5 м/с. При этом температура выдавливаемого из отвала холодного воздуха по результатам замеров достигает -17°C (рис. 5).

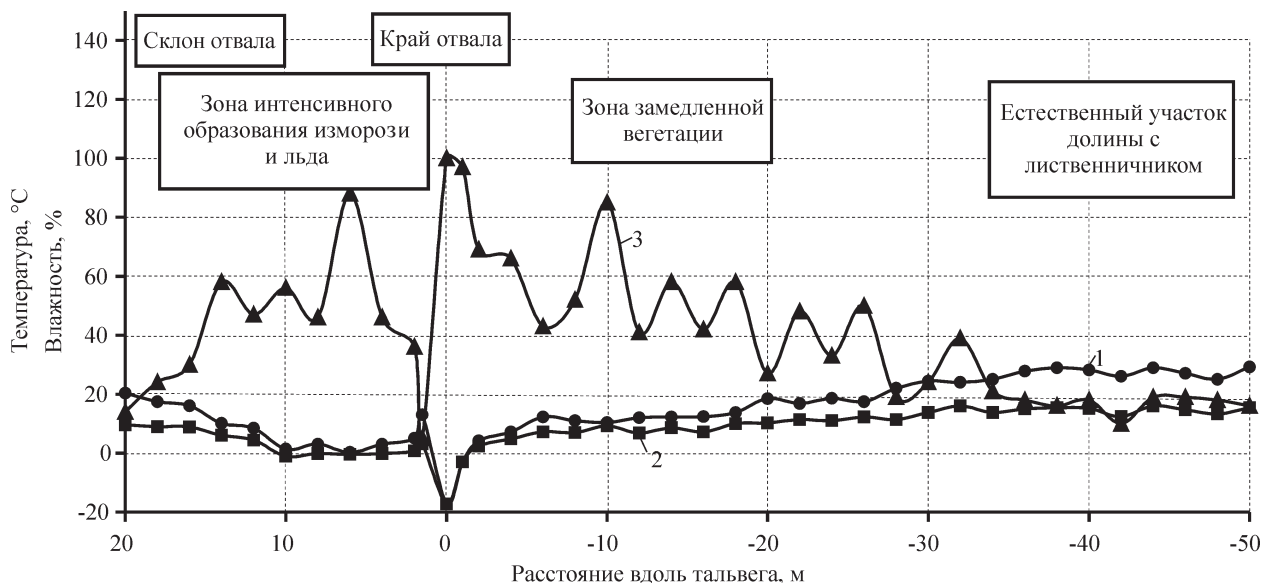


Рис. 5. Температура и влажность воздуха по температурному профилю через фронтальный откос отвала 670 к примыкающему лиственничнику. Измерения проведены в 0,5 м от поверхности грунта 1 июля 2000 г. в 17:00: 1, 2 – температура соответственно сухого и влажного термометра; 3 – относительная влажность

Fig. 5. The air temperature and humidity data in terms of a temperature section crossing the front slope of dump 670 toward the contiguous larch forest. Measurements were taken 0.5 m above the land surface, at 5 p. m., on July 1, 2000: 1, 2 – the dry and wet thermometer values, respectively; 3 – relative humidity

Конвекционный тепло-, массообмен. В формировании температурного режима отвалов пустых пород конвективный тепло-, массообмен проявляется в общем виде в образовании в массиве отвалов низкотемпературных зон, переохлажденных по сравнению с выше- и нижележащими слоями пород. В течение летнего периода продвижение температурной волны по вертикали осложняется повышением температур в подстилающих низкотемпературную зону породах, что определяется замещением холодного порового воздуха, стекающего по разрезу, теплым атмосферным воздухом, поступающим со стороны склонов отвалов. Конвективный тепло-, массообмен на участках складирования пустых пород характеризуется следующими явлениями.

В зимний период после охлаждения атмосферного воздуха ниже $-20\dots-25^{\circ}\text{C}$ на верхних участках отвалов (бровках откосов) формируются выходы переувлажненного теплого воздуха в виде отдельных султанов пара с образованием конусов кристаллической изморози высотой до 0,5 м.

В летний период конвективные воздушные потоки на участках приподошвенного слоя откосов отвалов формируют пояс кристаллической изморози и сублимационного льда. Эти процессы протекают активнее на наиболее низких гипсометрических уровнях (отвал 670). Высота слоя изморози достигает более 5,0 м, период существования – круглогодичный с преобразованием изморози к концу лета в натечные ледяные формы. В зоне активного влияния холодных воздушных потоков оказываются прилегающие к краям отвалов участки ландшафта с ненарушенными редкостойными лиственничниками, где на протяжении всего летнего периода формируется зона замедленной на 15–20 сут вегетации. Протяженность зоны влияния холодного воздуха и ширина зоны достигают 30–40 м.

Механизм образования изморози в летний период заключается, по нашему мнению, в следующем. Холодный влагонасыщенный воздух, выходящий из порового пространства отложенной отвала, выходит на поверхность на отдельных наиболее низких участках подошвы и охлаждает отдельные породы до отрицательной температуры. На остывшей ниже температуры точки росы поверхности происходит сублимация (в терминологии гляциологии) водяного пара из окружающего атмосферного воздуха в твердое состояние, минуя жидкую фазу.

Как по результатам инструментальных замеров, так и по качественным ощущениям наблюдателей поступление холодного воздуха из отвала носит пульсирующий характер, выражающийся в постоянном чередовании и замещении склонового холодного воздуха массами теплого атмосферного воздуха окружающей территории. Аналогичные процессы с фазовыми переходами воды происходят, очевидно, и в породах отвалов. Физическое описание процесса в общем виде может выглядеть следующим образом.

В зимний период – под влиянием зимнего воздуха с отрицательной температурой, затекающего непосредственно в породы отвалов и охлаждающего их через внешние границы за счет кондуктивного теплообмена, происходят насыщение порового воздуха влагой, ее конденсация и замерзание. Одновременно теплый поровой воздух выходит в атмосферу.

В летний период в результате нагрева пород отвала за счет солнечной радиации и кондуктивного теплообмена с окружающей средой происходит вытеснение холодного порового воздуха. Охлаждение пород за счет конвекции холодного воздуха приводит к выпадению на них конденсата в жидкой фазе с последующим его замерзанием и/или прямой сублимации льда.

ПРОГНОЗ ДИНАМИКИ ТЕХНОГЕННЫХ ГЛЕТЧЕРОВ МЕСТОРОЖДЕНИЯ КУБАКА

Наблюдаемые геотермические процессы на отвальных полигонах месторождения Кубака уникальны. В то же время они вызваны вполне закономерными природными морфоклиматическими условиями. Известно, что наличие природных каменных глетчеров указывает на существование условий перигляциальной зоны, т. е. их формирование в ее пределах – зональный морфогенетический процесс. Вообще перигляциальные морфогенетические районы характеризуются среднегодовой температурой от -1 до -15°C и среднегодовым количеством осадков (включая снег) 127–1397 мм (Тимофеев и др., 1983). В этом отношении климатические условия района месторождения Кубака (среднегодовая температура -12°C и осадки 754 мм/год) хорошо укладываются в «параметры» перигляциальной зоны морфогенеза.

Техногенез здесь играет роль литологического фактора, в результате которого на склонах была сформирована азональная для данного района морфоскульптура. Дальнейшие процессы ее трансформации связаны с криогенными преобразованиями, заполнением пустот между обломками мелкоземистыми фракциями и ледяным цементом. Прямые и косвенные признаки этих процессов были зафиксированы визуально (рост ледяного пояса, исчезновение стока из-под отвалов), а также на основе данных 3-летнего геотермического мониторинга по скважинам.

Каменные глетчеры присклонового типа, наблюдаемые в районе месторождения Кубака, по морфометрическим и литологическим характеристикам, мощности, размерам и условиям залегания в рельефе, мерзлотно-гидрогеологическим условиям представляются наиболее близкими природными аналогами исследованных отвалов. Это, конечно, не означает, что отвалы месторождения Кубака трансформируются в конечном итоге в обычные каменные глетчеры. Но, имея пример формирования техногенных глетчеров в Хибинах, мы не можем полностью исключить, что отвалы

Таблица 1. Расчет давления пластических деформаций и коэффициентов течения каменного глетчера Цирк (Корякский хребет)

Table 1. Estimation of basal stress of plastic deformations and flow coefficients of rockglacier Cirque (Koryak Range)

	Расчетные параметры				
Мощность h , м	30	50	30	50	50
Плотность ρ , кг/м ³	1700	1700	1700	1700	1700
Наклон ложа α , ...°	12	12	12	12	12
Поверхностная скорость v , м/с	0,5	0,5	1	1	2
n	3	3	3	3	3
$\tau = \rho gh \sin \alpha$, бар	1,039	1,732	1,039	1,732	1,732
$A_{к.г.} = v(n+1)/[2 \tau^n h]$, лет ⁻¹	0,0297	0,0039	0,0594	0,0077	0,0154

месторождения Кубака на каком-то этапе промерзания и посттехногенного преобразования не будут обладать реологическими и динамическими свойствами природных каменных глетчеров региона.

Механика движения каменных глетчеров описывается законом пластических деформаций Дж. Глена и имеет вид: $\epsilon = k\tau^n$, где ϵ – скорость деформации; k и n – коэффициенты; τ – напряжение сдвига (Barsch, 1996). Коэффициент k определяется температурой движущейся пластичной массы. Коэффициент n обычно принимается равным 3.

Давление в основании движущегося глетчера определяется $\tau = \rho gh \sin \alpha$, где ρ – плотность ледово-грунтовой массы; g – ускорение свободного падения; h – мощность глетчера; α – угол наклона ложа, по которому происходит пластическое движение.

Для удобства оценки скоростей движения каменных глетчеров в конкретных морфоклиматических районах Д. Баршем (Barsch, 1996) применялся способ расчета коэффициентов течения на основе наблюдений за эталонными каменными глетчерами и ледниками. Использовалась зависимость $A_{к.г.} = v(n+1)/[2 \tau^n h]$, где $A_{к.г.}$ – коэффициент течения каменного глетчера, определяемый климатическими и погодными условиями района; v – скорость движения; h – мощность каменного глетчера; коэффициент $n = 3$.

Так, в результате многолетних наблюдений за движением комплексного каменного глетчера Галена Крик (Кордильеры) было установлено, что скорости поверхностных движений в осевой части варьируют от 0,64 до 0,98 м/год (Porter, 1972; Barsch, 1996). Мощность этого глетчера на отдельных участках изменяется от 30 до 150 м. Используя коэффициент течения для обычных ледников $A_{л.} = 1,6 \times 10^{-2}$, плотность которых существенно ниже плотности каменных глетчеров, а также известную среднюю скорость их движения (0,5 м/год), Д. Барш рассчитал таблицу коэффициентов течения и при разных мощностях для уклона 10° при среднегодовой температуре -10°C (Barsch, 1996). Так, при скорости движения 0,5 м/год и мощности 30 м давление в основании составляет 0,9 бар, а коэффициент $A_{к.г.} = 4,56 \times 10^{-2}$ лет⁻¹. Для мощности 50 м давление

$\tau = 1,6$ бар, коэффициент течения $A_{к.г.} = 0,49 \times 10^{-2}$ лет⁻¹. При использовании коэффициентов течения исчезает необходимость сложных расчетов и оценки всех параметров движущегося каменного глетчера. Получаемые значения скоростей и перемещений имеют осредненные многолетние значения и вытекают лишь из физических характеристик ледово-грунтовых тел.

Для расчета коэффициентов течения природных каменных глетчеров и проверки модели Д. Барша нами использованы данные о скоростях движения наиболее изученных в регионе каменных глетчеров Цирк и Одинокий (Корякское нагорье), которые варьируют от первых сантиметров до 1,5 м/год (Галанин, Глушкова, 2004; Галанин, 2005). Для оценки коэффициента течения плотность исследованных глетчеров была принята 1,8 кг/м³. Исходные и расчетные данные для глетчера Цирк приведены в табл. 1.

Для расчета временного графика пластических деформаций отвалов месторождения Кубака нами использованы метеорологические данные о среднегодовом количестве осадков и испарении. В ходе наблюдений было установлено, что поверхностный и подповерхностный сток из отвалов по завершении их отсыпки прекратился. Данные геотермического мониторинга и поверхностные признаки показывают, что все неиспарившиеся осадки накапливаются в виде льда-цемента внутри отвала. Поэтому правомочно считать, что скорость насыщения будет близка к разности между общим количеством выпадающих на поверхность отвала осадков и теоретическим испарением, рассчитанным для незадернованной поверхности. Скорость накопления льда внутри отвалов может быть даже выше вследствие его выпадения из фильтрующегося воздуха при переходе через точку росы. В модели нами рассчитаны динамические свойства отвалов при разных скоростях насыщения льдом – 25, 50 и 100 мм/год и различной исходной мощности (табл. 2, рис. 6). Угол наклона ложа взят постоянным – 12°. Для приблизительной оценки мы использовали скорость насыщения льдом 50 мм/год.

Скорость насыщения отвалов льдом-цементом, мощность и исходная пористость являются главными факторами, определяющими как конечные

Таблица 2. Прогнозная оценка изменения динамических характеристик отвала в процессе его промерзания и скорости насыщения льдом 50 мм/год

Table 2. Forecast of the reology features of freezing dump at 50 mm/year ice saturation rate

Расчетные параметры	Время после формирования отвала, годы / календарный год						
	5/2004	10/2009	20/2019	40/2039	80/2079	140/2139	180/2179
Мощность отвала h , м	30	30	30	30	30	30	30
Наклон ложа α , ...°	12	12	12	12	12	12	12
$\sin \alpha$	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
Скорость насыщения льдом, мм/год	50	50	50	50	50	50	50
Плотность обломочного материала, кг/м ³	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400
Плотность льда, кг/м ³	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Исходная пористость отвала, доля от 1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Насыщенность льдом, % от объема отвала	2,8	5,6	11,1	22,2	44,4	77,7	100
Ожидаемая плотность отвала, кг/м ³	1688	1697	1713	1747	1813	1913	1980
Давление в основании отвала τ , бар	0,03	0,06	0,12	0,24	0,49	0,91	1,21
Скорость движения, мм/год	< 0,001	0,003	0,042	0,705	12,6	139,1	421,1
Суммарное перемещение, мм	< 0,001	0,013	0,286	7,447	227,6	4021	15135

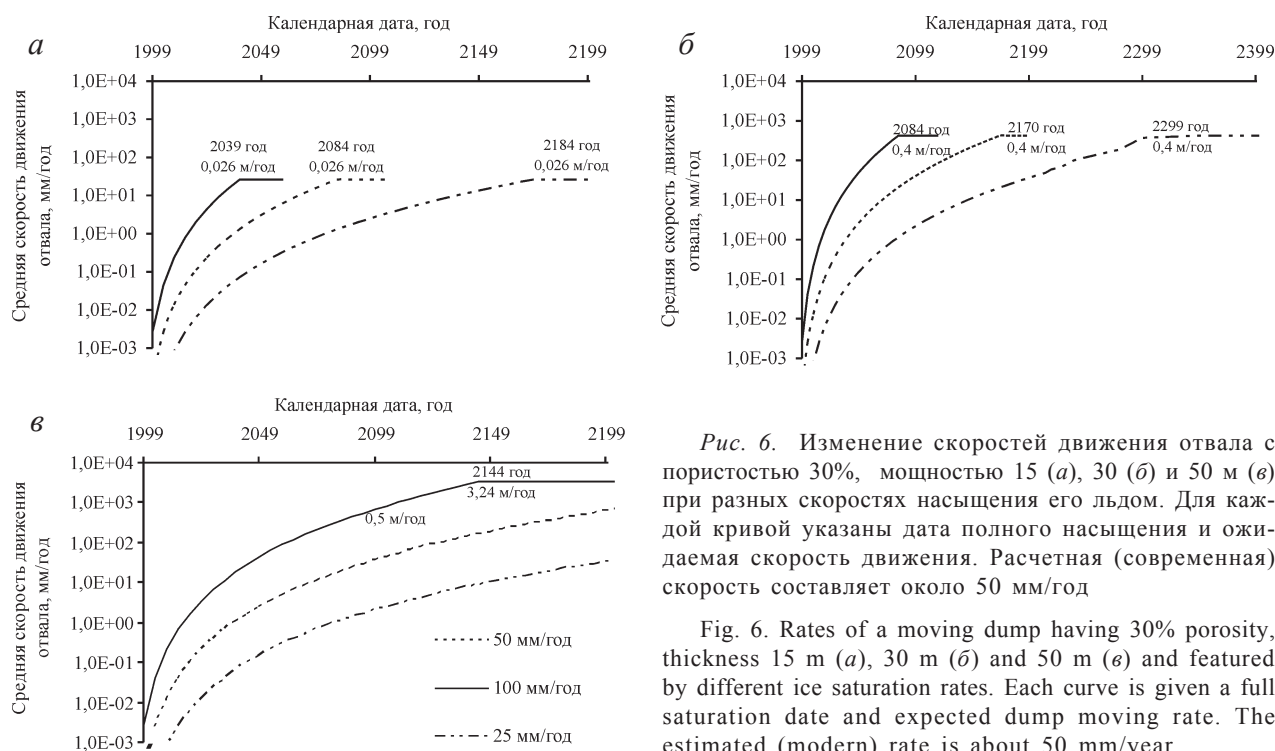


Рис. 6. Изменение скоростей движения отвала с пористостью 30%, мощностью 15 (а), 30 (б) и 50 м (в) при разных скоростях насыщения его льдом. Для каждой кривой указаны дата полного насыщения и ожидаемая скорость движения. Расчетная (современная) скорость составляет около 50 мм/год

Fig. 6. Rates of a moving dump having 30% porosity, thickness 15 m (a), 30 m (b) and 50 m (v) and featured by different ice saturation rates. Each curve is given a full saturation date and expected dump moving rate. The estimated (modern) rate is about 50 mm/year

динамические свойства формирующихся ледо-грунтовых тел, так и период между завершением формирования отвала и началом существенных пластических деформаций (см. рис. 6). Проведенные расчеты показывают, что ожидаемые давления в основаниях окончательно «промерзших» отвалов сопоставимы с природными каменными глетчерами (Barsch, 1996) и для наиболее мощных отвалов могут достигать 2 бар. В то же время насыщение конгеляционным льдом – процесс весьма медленный, и даже при интенсивном ледообразовании для полной цементации обломочного материала в теле отвала требуется более 100 лет. Видимые пластические деформации в телах некоторых отвалов могут проявиться в ближайшие 40–50 лет, за этот период скорость движения наибо-

лее мощных тел достигнет нескольких сантиметров в год, а суммарные перемещения – первых метров. Средние окончательные скорости движения отвалов мощностью около 30 м достигнут максимальных значений 0,4 м/год при высокой увлажненности к 2090 г., при средней расчетной – к 2170 г., а при малом количестве осадков и увлажнении – лишь спустя 300–400 лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные отвалы месторождения Кубака являются уникальным объектом Северо-Востока для исследования постгенетических преобразований техногенной морфоскульптуры. Проведенные наблюдения и результаты геотермичес-

кого мониторинга дают основание считать, что в настоящее время внутри отвалов развиваются естественные процессы зонального морфогенеза. При их участии возникают новые образования, классифицируемые как техногенные глетчеры. Они сложены грубообломочным каменным материалом, сцементированным льдом преимущественно конжеляционным и сегрегационного происхождения. Основным морфодинамическим признаком и условием активности природных и техногенных каменных глетчеров является значительная мощность (не менее 15 м).

Проведенные расчеты показали, что при полном насыщении свободной пористости ледяным цементом давления в основаниях некоторых отвалов могут возрасти до 1,5 бар, что приведет к активизации процессов пластического течения со скоростью до 0,5 м/год и более. Полученные оценки, на наш взгляд, вполне реальны, поскольку сопоставимы с наблюдаемыми процессами движения природных каменных глетчеров в регионе. Проведенные исследования не дают оснований для прогнозирования катастрофических сценариев, но в то же время расходятся с бытующими представлениями о том, что «промерзшие» за несколько лет отвалы динамически пассивны и «криогенно законсервированы». Исходные физические свойства отвалов и морфоклиматические условия районов, в которых они локализованы, сами по себе являются причинами самопроизвольного преобразования в каменные глетчеры, что уже было наглядно подтверждено их массовым формированием в Хибинах. Процесс насыщения грубообломочных масс ледяным цементом весьма длительный, и при современных климатических условиях для начала значительных пластических деформаций в отвалах месторождения Кубака потребуется не менее 70–80 лет. Наиболее активные движения могут произойти только через 100–150 лет.

Полученные значения давлений, скоростей и перемещений техногенных ледово-грунтовых образований месторождения Кубака имеют пока лишь прогнозный характер. Мы не можем утверждать, что в ходе постгенетических преобразований отвалов месторождения Кубака сформируются полные аналоги природных каменных

глетчеров. Известно, что природные каменные глетчеры быстро переходят в неактивные формы, если по каким-то причинам приостанавливается или полностью исчезает их периодическое подпитывание обломочным материалом со склонов. В связи с этим можно предполагать, что техногенные каменные глетчеры не могут существовать длительное время в динамически активной форме. Для более точного прогноза динамики промерзания и посттехногенной трансформации отвалов необходима постановка наблюдений за их температурой и гидрологическим режимом. На основе гидрологических данных возможно более точное прогнозирование объема поступающего в отвалы льда, давлений и скоростей пластических деформаций.

ЛИТЕРАТУРА

- Барабанов А. В., Калинина Т. А. «Апатит» из века в век. – Кировск : ОАО «Апатит», 2004. – 360 с.
- Галанин А. А. Каменные глетчеры – особый тип современного горного оледенения северо-востока Азии // Вестник ДВО РАН. – 2005. – № 5. – С. 59–70.
- Галанин А. А., Глушкова О. Ю. Строение и динамика бронированных ледников и каменных глетчеров хребтов Корякский и Искатень в позднем голоцене // Материалы гляциологических исследований. – 2004. – Т. 97. – С. 161–169.
- Горбунов А. П. Каменные ледники. – Новосибирск : Наука, 1988. – 110 с.
- Моторов О. Н., Замощ М. Н., Галанин А. А. Геотермические эффекты при промерзании отвалов пустых пород в горных условиях криолитозоны (на примере золото-серебряного месторождения Кубака, Магаданская область) // Наука Северо-Востока России – начало века : Материалы Всерос. науч. конф., посвящ. памяти акад. К. В. Симакова и в честь его 70-летия (Магадан, 26–28 апреля 2005 г.). – Магадан : СВНЦ ДВО РАН, 2005. – С. 395–399.
- Тимофеев Д. А., Уфимцев Г. Ю., Онухов Ф. С. Терминология перигляциальной геоморфологии. – М. : Наука, 1983. – 199 с.
- Barsch D. Rockglaciers: Indicators for the Present and Former Geoecology in High Mountain Environments. – Berlin : Springer-Verlag, 1996. – 331 p.
- Potter N. Jr. Ice-cored rock glacier, Galena Creek, northern Absaroka Mountains, Wyoming // Geological Society of Am. Bull. – 1972. – P. 3025–3057.

Поступила в редакцию 12.01.2006 г.

INDUSTRIAL ROCK GLACIERS IN LODGE-MINING AREAS OF NORTHEASTERN RUSSIA

A. A. Galanin, O. V. Motorov, M. N. Zamosch

This paper deals with the structure, morphology and morphodynamics of industrial (post-mining) dumps at Kubaka gold-silver lode. It contains the three-year geothermal monitoring data for a set of drill holes and also presents the results of observation of different thermal processes in dumps. In conditions of a periglacial morphogenesis, an intense accumulation of cementing ice takes place in porous psephitic rocks of frozen dumps. According to calculations made, in conditions of a complete ice saturation, the pressure at the basis of some dumps will be about 1.5 bar in 50–100 years. In this case, plastic deformations may take place there and flow rates will be about 0.5 m/year. Predicted dump structures will be similar, in terms of their morphodynamic characteristics, to slope rock glaciers typical of the study area.

Key words: industrial rock glaciers, dump freezing and dynamics, periglacial morphogenesis, geothermal monitoring of dumps.