



ДИНАМИКА ТЕПЛООВОГО ПОЛЯ ПРОМЕРЗАЮЩИХ ОТВАЛОВ МЕСТОРОЖДЕНИЯ КУБАКА (КОЛЫМСКОЕ НАГОРЬЕ)

THERMAL FIELD DYNAMICS OF FREEZING DUMPS OF THE KUBAKA DEPOSIT (KOLYMA UPLAND)

ГАЛАНИН А.А.

Заведующий лабораторией региональной геокриологии и криолитологии Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, д.г.н., г. Якутск, agalanin@gmail.com

МОТОРОВ О.В.

Ведущий научный сотрудник лаборатории техногенных экосистем ОАО «Институт золота и редких металлов» (ОАО «ВНИИ-1»), к.г.-м.н., г. Магадан

GALANIN A.A.

The head of the Laboratory of Regional Geocryology and Cryolithology of the Melnikov Permafrost Institute of the SB RAS, doctor of science (Geography), Yakutsk, agalanin@gmail.com

MOTOROV O.V.

A lead staff scientist of the Laboratory of Technogenic Ecosystems of the «Institute of gold and rare metals» OJSC («VNIИ-1» OJSC), candidate of science (Geology and Mineralogy), Magadan

Ключевые слова:

промерзание отвалов; геотермический мониторинг; месторождение Кубака; Колымское нагорье; техногенные каменные глетчеры.

Key words:

freezing of dumps; geothermal monitoring; Kubaka Deposit; Kolyma Upland; technogenic rock glaciers.

Аннотация

В статье рассмотрена динамика теплового поля промерзающих отвалов крупнейшего золоторудного месторождения Кубака в Магаданской области. Результаты их мониторинга, проводившегося в течение 7 лет, позволили выявить сложный характер протекающих в них геотермических процессов и сопровождающих их вторичных явлений, которые в конечном итоге могут привести к трансформации отвалов в техногенные мерзлотные образования, схожие с природными каменными глетчерами.

Введение

Промышленное освоение природных ресурсов в условиях криолитозоны нередко приводит к формированию техногенных форм рельефа, которые в ходе неизбежного охлаждения и промерзания становятся также криогенными образованиями, обладающими специфическим строением. Особое место в этом списке занимают промерзающие и насыщающиеся льдом горные отвалы. Так, на Норильском медно-никелевом месторождении на северо-западе плато Путорана некоторые насыщенные льдом отвалы трансформируются в динамичные, подобные каменным глетчерам тела, перемещающиеся с угрожающими скоростями до 1 м/сут [2, 3]. В исключительных случаях возникают и катастрофические последствия. Например, на плато Расвумчор в Хибинах техногенный каменный глетчер, сорвавшись со своего ложа, превратился в ледово-каменный сель и переместился на 2,5 км вниз по долине [4]. Без учета масштаба, некоторые черты этого явления можно сопоставить с хорошо известным катастрофическим селем, возникшим в результате отрыва перегруженной каменным материалом краевой части ледника Колка на Кавказе.

С точки зрения геологического времени техногенные образования создаются «мгновенно», поэтому они являются некими термодинамическими аномалиями, возникающими на фоне медленных и циклично развивающихся природных рельефообразующих процессов. Эти аномалии будут активно преобразовываться самопроизвольно или посредством естественных агентов. Причем велика вероятность трансформации техногенного объекта в наиболее близкий естественный аналог.

С данной точки зрения изучение процесса эпигенетического промерзания горных отвалов не только представляет практический интерес, но и позволяет

Abstract

The article considers the thermal field dynamics of freezing dumps of the large gold deposit of Kubaka in the Magadan Region. The monitoring results of them for 7 years permitted to reveal a complicated character of the geothermal processes proceeding in them and secondary phenomena accompanying the processes that in the long run can lead to transformation of the dumps into technogenic permafrost formations resembling natural rock glaciers.



более объективно вникнуть в суть таких природных криогенных образований и явлений, как курумы, каменные глетчеры, ледово-каменные сели, ледники.

Объект исследований

Кубака (63°42' с.ш., 159°58' в.д.) — одно из крупнейших коренных золоторудных месторождений Магаданской области, отрабатывавшееся с 1993 по 2003 г. Оно расположено в восточной части Колымского нагорья в бассейне реки Омолон. Занятая отвалами площадь составляет около 4 км², их общий объем — более 60 млн м³, максимальная мощность — 56 м. Отвалы сложены грубообломочным материалом диоритов и метасоматитов. Они отсыпались круглогодично в процессе отработки месторождения в виде террас на склоны западной экспозиции крутизной 10–12° (рис. 1).

Климат рассматриваемого района резко континентальный, среднегодовая температура воздуха составляет минус 12°С, осадков выпадает 754 мм в год. Многолетнемерзлые породы (ММП) мощностью до 200–250 м и температурой от минус 1,5 до минус 5,4°С имеют сплошное распространение. Поэтому лежащая в основе рекультивации рабочая гипотеза так называемой методики криогенной консервации отвала-

лов месторождения Кубака состояла в том, что за два-три года они промерзнут и их тепловое поле приблизится к естественному состоянию. Но в процессе отсыпки отвалов стали возникать аномальные температурные явления, такие как восходящие потоки нагретого воздуха на бровках отвалов (в осенний период), нисходящие потоки переохлажденного воздуха во фронтальной части (в летний период), замедление вегетации растительного покрова более чем на месяц на участках, примыкающих к фронту. Здесь же наблюдалось периодическое возникновение пояса изморози на растительности, формирование ледяного цемента в нижней части отвалов. Одновременно отмечено снижение, а затем полное прекращение стока с территории отвальных полигонов.

Указанные явления послужили основанием для организации геотермического мониторинга, цель которого заключалась в исследовании температурного режима и закономерностей промерзания отвалов. Всего было пробурено пять скважин на двух модельных отвалах (см. рис. 1). Наблюдения продолжались ежемесячно с мая 2000 г. по декабрь 2003 г. и далее с июня по ноябрь 2003 г. В 2004 г. наблюдений не проводилось. С марта 2005 г. по июль 2007 г. наблюдения проводились ежемесячно, за исключением марта 2006 г. и апреля 2007 г.



Рис. 1. Общий вид карьера и отвальных полигонов отрабатанного золоторудного месторождения Кубака (Колымское нагорье): а — отвальный полигон Западный; б — карьер; с — отвальный полигон Восточный; d — погребенный тальвег долины ручья Восточный; e — днище долины и направление течения р. Кубака; f — участок наиболее интенсивного сублимационного ледообразования и замедленной вегетации; 1–5 — номера и положение геотермических скважин; 1–2 — отвал № 796; 3–5 — отвал № 790

Результаты первых трех лет наблюдений [1, 5, 7] показали, что тепловое поле отвалов на начальном этапе было крайне неоднородным. В них возникали сезонные мигрирующие отрицательные и положительные аномалии. В настоящей статье мы впервые предлагаем обсудить весь ряд геотермических данных с 2000 по 2007 г.

Строение отвалов

По масштабу отвалы месторождения Кубака соответствуют геоморфологическим элементам ранга мезоморфоскульптуры и формируются сверху вниз вдоль топографических контуров бортов долин в виде последовательных ярусов. К подножию каждого отвала примыкает горизонтальная берма (поверхность) следующего отвала. Их мощность варьирует от 15 до 59 м.

Исходный состав коренных пород, технология их дробления и отсыпки определяют внутреннюю структуру и температурное поле отвалов на начальной стадии их формирования. Отвалы сложены преимущественно щебне-глыбовым материалом вулканогенно-осадочных и интрузивных пород девонского возраста. В качестве объектов изучения были выбраны два отвала полигона Восточный — № 796 и 790¹.

Отвал № 796 формировался с июля 1997 г. по январь 1998 г. (площадь бермы/основания — 113,3/19,8 тыс. м²; ширина бермы средняя/максимальная — 70/96 м; высота отвала средняя/максимальная — 15/24 м). Рекультивация поверхности бермы была завершена в июле 1998 г. На поверхности отвала пробурено две геотермические скважины (см. рис. 1).

Отвал № 790 формировался с августа 1997 г. по май 1998 г. (площадь бермы/основания — 17,4/52,2 тыс. м²; ширина бермы средняя/максимальная — 70/100 м; высота отвала средняя/максимальная — 27/38 м). Рекультивация бермы была завершена в июне 2000 г. В отвале пробурен профиль из трех геотермических скважин (см. рис. 1).

Обобщенный разрез отвалов содержит следующие горизонты (снизу вверх):

- коренные субвулканические породы (туфы риодацитов, игнимбринов, туфопесчаников и туфоалевролитов, трахириолиты, риолито-дациты и андезиты) пестрого состава цокольной позднедевонско-раннекаменноугольной толщи (мощность более 200 м);
- нерасчлененные валунно-щебнистые ледниковые отложения с суглинисто-песчаным заполнителем, залегающие в виде линз, высокольдистые, преобразованные криогенными и современными склоновыми процессами (мощность 1–8 м);
- пролювиально-солифлюкционные щебнисто-дресвяные отложения с суглинисто-песчаным заполнителем, жилами и линзами льда, прослоями торфа и растительных остатков, криотурбированные (мощность 0,5–3,0 м);
- крупноглыбовые отложения нижнего горизонта отвалов со слабым заполнением мелкоземом и пористостью до 30–40% (мощность 3–5 м);

- крупно- и среднеглыбовые отложения среднего горизонта с дресвяным заполнителем и пористостью до 30% (мощность на разных отвалах от 8 до 40 м);
- уплотненный щебне-глыбовый верхний горизонт с дресвяно-песчаным заполнителем и пористостью 10–20% (мощность 1–3 м).

Средняя мощность многолетнемерзлых пород в пределах отвальных полигонов составляет около 200 м. Ненарушенные подстилающие коренные породы находятся в многолетнемерзлом состоянии с температурой от минус 1,5 до минус 5,4°C и характеризуются невысокой суммарной льдистостью (0,31–0,88%). Поскольку специальное изучение и картографирование многолетнемерзлых отложений на проектной территории отвалов не выполнялось, не исключается возможность захоронения под ними некоторых высокольдистых отложений. На близлежащих к отвалам участках они представлены ледниковыми, аллювиальными и полигенетическими склоновыми фациями. Содержание жильного, шлирового и цементирующего льда в некоторых из них достигает 90%.

Для техногенной части разреза отвалов характерно преобладание глыбовых разностей, в т.ч. размером более 2 м с минимальным количеством или отсутствием заполнителя. Это обусловлено процессами естественной сортировки обломков, возникающими при отсыпке отвалов.

Технология формирования отвала состоит в том, что очередная порция материала привозится и высыпается в виде кучи у края, затем сдвигается бульдозером к бровке и обрушивается с фронтального откоса. Более крупные и массивные обломки из-за их большей инертной массы скатываются значительно дальше основания фронтального откоса и образуют крупноглыбовый шлейф. Мелкие обломки и щебень накапливаются выше по откосу. В процессе отсыпки фронт отвала наступает и погребает под собой глыбовый горизонт шлейфа. Мощность крупноглыбового слоя в подошве отвалов составляет около 3 м.

Таким образом, отвал наращивается по своему фронту и движется вперед, сохраняя одинаковую высоту и уплощенную морфологию бермы, крутой фронтальный уступ с крутизной, близкой к углу естественного откоса. Поскольку исходной подстилающей поверхностью (ложем) является склон, то мощность отвала нарастает от тыловой части к его бровке.

За счет многократного укатывания и бульдозерной планировки бермы представляют собой плоские, близкие к горизонтальным, сильно уплотненные поверхности, сложенные измельченным до дресвяно-супесчаной фракции грунтом. Плотность поверхностного слоя достигает 1,9–2,4 г/см³, мощность — 1,0–1,5 м.

Методика геотермического мониторинга

В каждой из пяти пробуренных геотермических скважин установлено от 11 до 16 термодатчиков производства компании EBA Engineering Consultants в интервале глубин от 0 до 44 м. Термокосы были погружены в скважины с извлеченными буровыми трубами

¹ По принятой в проекте системе идентификации номера отвалов соответствуют абсолютной высоте их поверхности (бермы).



и засыпаны буровым шламом для предотвращения искажений, вызываемых конвективным теплообменом в стволе скважины.

Измерения температуры во всех скважинах выполнялись ежемесячно и одновременно с мая 2000 г. по декабрь 2006 г. Результаты наблюдений выборочных горизонтов отвалов приведены в виде временных температурных рядов, или вариограмм (рис. 2, 3). Перерыв на вариограмме указывает на отсутствие наблюдений в данный период.

Для анализа динамики теплового поля отвалов были выполнены оценки средних, максимальных и минимальных значений по разрезу, по глубине и по времени. Временные ряды средних значений температуры по вертикальному разрезу каждой скважины вычислялись путем осреднения температуры по всем термисторам для каждой даты измерения. Они характеризуют общую динамику температурного поля в отвалах во времени.

Средние значения по каждому из горизонтов за весь период измерений были получены путем осреднения всех значений временного ряда для заданного термистора. Для сравнения теплового поля отвала в начале и в конце периода наблюдений были рассчитаны средние значения за 2000–2001 и 2006–2007 гг.

Для оценки абсолютной амплитуды колебаний температуры были определены максимальные и минимальные значения за весь период наблюдений по каждому термистору для каждой скважины. Кроме того, были рассчитаны годовые амплитуды температуры на каждом термисторе для каждой скважины.

Динамика температурного поля отвалов

Полученные данные указывают, что температурное поле отвалов на протяжении всего периода наблюдений остается нестабильным и изменяется во времени (см. рис. 2, 3).

Отвал № 796

В скважине 1 (см. рис. 2, а) средняя температура всего разреза (среднее значение из результатов одновременных измерений всеми термисторами) за период наблюдений варьировала от минус 4,85 до плюс 1,07°C (амплитуда этой вариации составила 5,92°C). Сезонные вариации проявлялись следующим образом. На глубине 2 м (термисторе 1) температура варьировала от минус 13,09 до плюс 11,81°C (с амплитудой 24,9°C). В нижней части разреза скважины 1 на глубине 16 м (на уровне подошвы отвала № 796) максимальная температура варьировала от минус 2,03 до минус 7,41°C (с амплитудой 5,38°C). Среднее значение всех температур, наблюдаемых в скважине за семь лет (средняя температура отвала), составило минус 1,70°C.

В скважине 2 (см. рис. 2, б) осредненная по вертикальному разрезу температура за период наблюдений варьировала от минус 2,87 до плюс 1,01°C (с амплитудой 3,88°C). Максимальные колебания температур от минус 7,18 до плюс 11,37°C (с амплитудой 18,55°C) наблюдались на глубине 2 м (термисторе 1), минимальные от минус 0,91 до минус 1,69°C (с амплитудой 0,77°C) — на глубине 20 м (на уровне подошвы отвала).

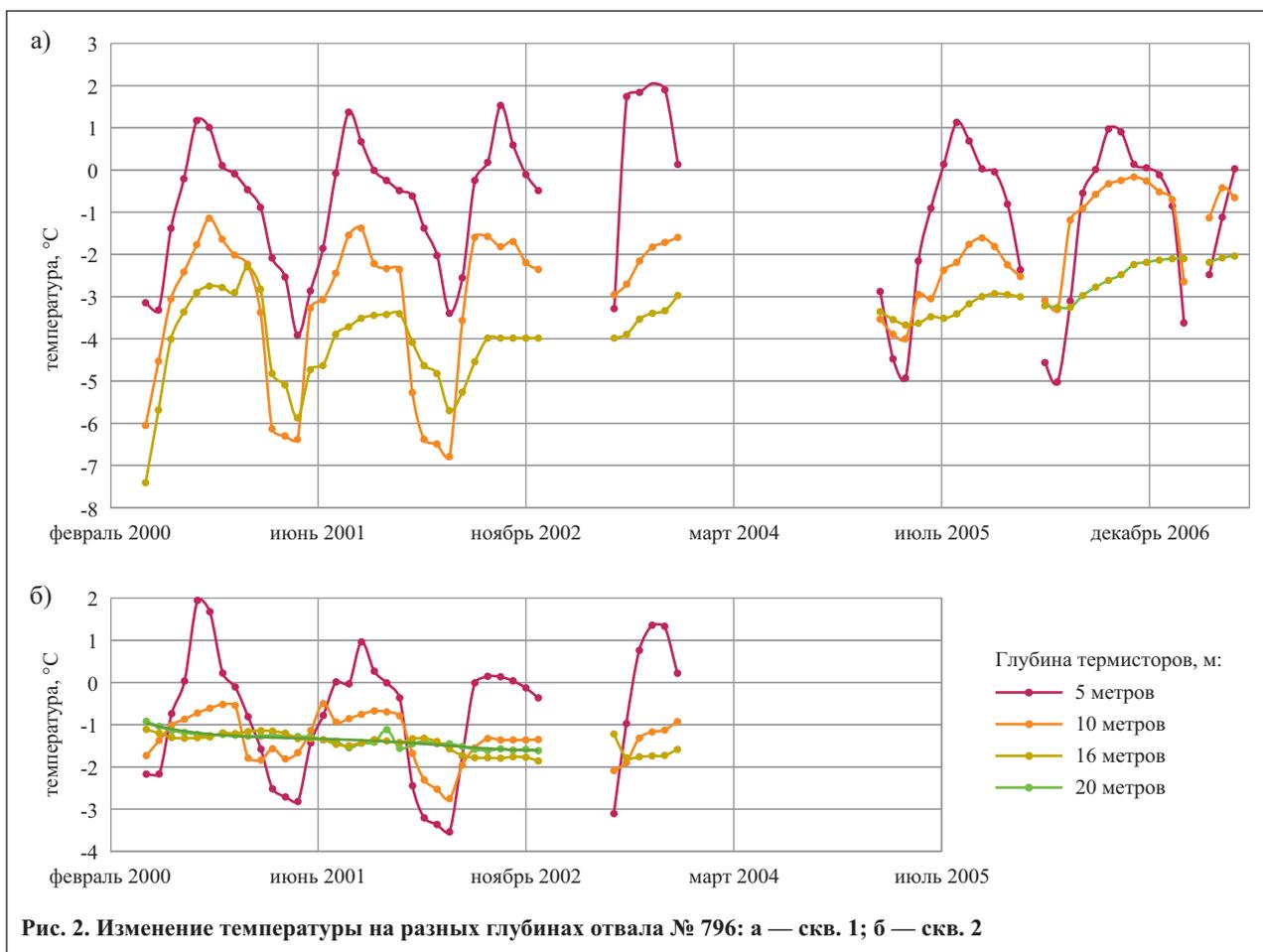


Рис. 2. Изменение температуры на разных глубинах отвала № 796: а — скв. 1; б — скв. 2

Среднее значение всех наблюдаемых по скважине температур (средняя температура отвала) составило минус 0,79°C.

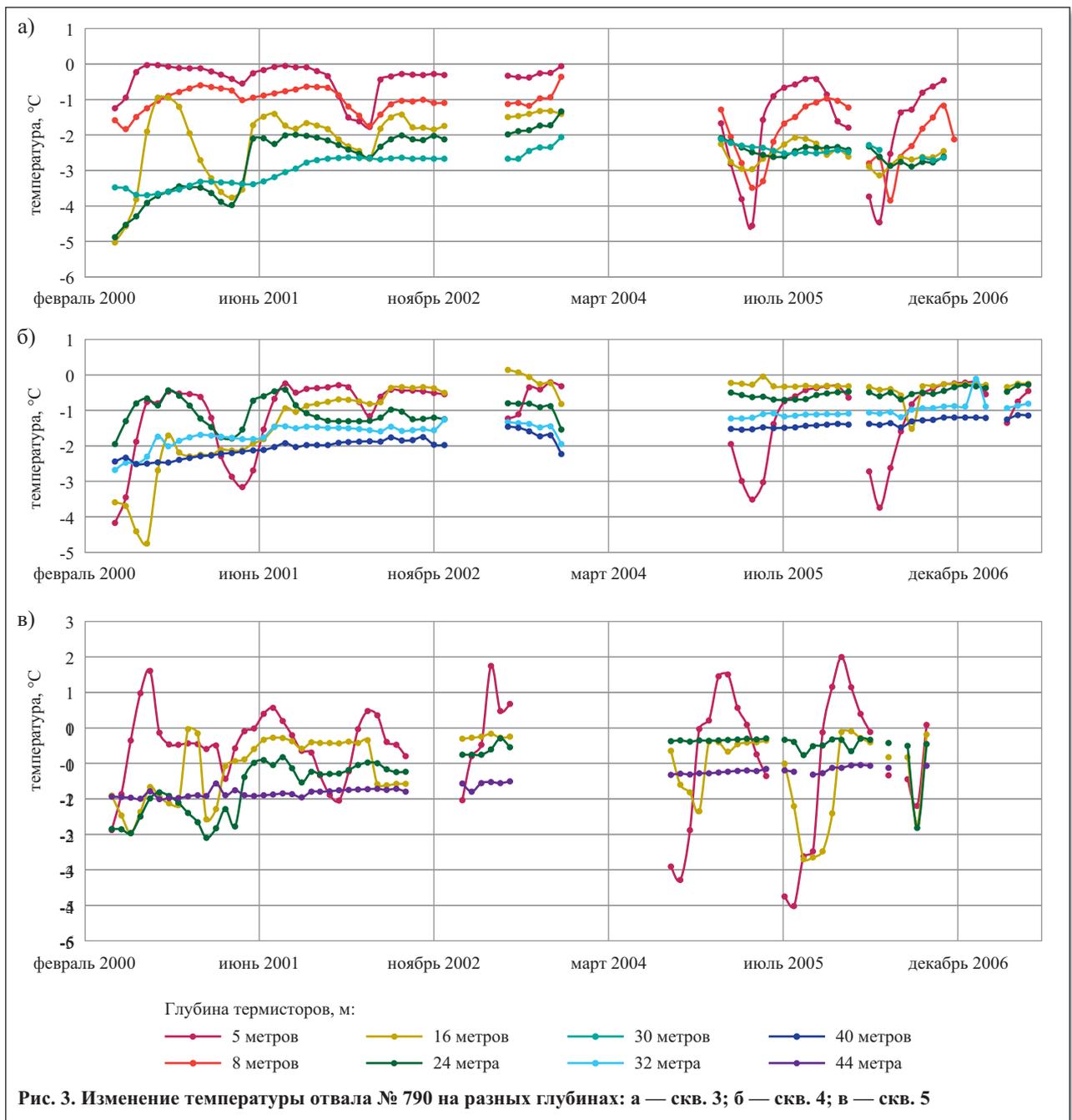
Показательной характеристикой динамики температурного поля отвала № 796 является изменение средней годовой температуры на разных горизонтах (осреднялись результаты измерений на каждом термисторе за 12 месяцев) в начальный (2000–2001) и последний (2006–2007) годы наблюдений. Так, в скважине 1 с 2000 по 2007 г. средняя годовая температура понижалась на всех горизонтах отвала глубже 7 м (на термисторах 1–5). Максимальное понижение с минус 0,48 до минус 1,34°C было зафиксировано на термисторе 1 на глубине 2 м. На глубинах более 7 м вплоть от уровня подошвы отвала (на термисторах 6–11) происходило устойчивое повышение температуры. Максимальное повышение от минус 3,91 до минус 1,56°C было установлено для глубины 12 м (на термисторе 9) и составило 2,35°C. На подошве отвала на глубине 16 м (на

термисторе 11) температура повысилась от минус 2,06 до минус 1,54°C, т.е. на 1,29°C.

Отвал № 790

В скважине 3 (см. рис. 3, а) осредненная температура разреза за весь период наблюдений варьировала от минус 3,68 до плюс 0,87°C (с амплитудой 4,55°C). Максимальная вариация температур от минус 10,69 до плюс 13,5°C (с амплитудой 24,19°C) была отмечена на глубине 2 м (термисторе 1). Минимальная амплитуда (1,64°C) колебаний температуры от минус 2,04 до минус 3,68°C наблюдалась на глубине 30 м (на уровне подошвы отвала, термисторе 16). Аномально высокие вариации температуры с амплитудой 5°C были отмечены на глубине 21 м. Среднее значение всех температур по вертикали в скважине 3 за весь период наблюдений составило минус 1,67°C.

Так же как и в двух предыдущих скважинах, в скважине 3 было установлено закономерное снижение





среднегодовой температуры поверхностного слоя до глубины 12 м (на термисторах 1–9) и повышение температур нижних горизонтов (на термисторах 10–16). Максимальное снижение годовой температуры за шесть лет от плюс 1,43 до минус 0,87°C (с амплитудой 2,3°C) было установлено на глубине 2 м (термисторе 1). За тот же период на уровне подошвы отвала (на глубине 30 м, термисторе 16) было зафиксировано повышение среднегодовой температуры на 1,00°C (от минус 3,48 до минус 2,49°C). Однако максимальное повышение среднегодовой температуры в скважине 3 от минус 3,89 до минус 2,57°C было зафиксировано на глубине 24 м (термисторе 14) и составило 1,32°C.

В скважине 4 (рис. 3, б) были установлены максимальные сезонные вариации средней температуры разреза от минус 3,76 до плюс 1,33°C (с амплитудой 5,09°C), причем средняя температура разреза за весь период наблюдений составила минус 0,91°C. Сезонные колебания температуры наиболее сильно проявлялись в поверхностном слое на глубинах до 2 м (на термисторе 1) — от минус 16,96 до плюс 18,12°C (с амплитудой 35,08°C). На уровне подошвы отвала (на глубине 40 м, термисторе 16) были зафиксированы минимальные сезонные вариации температуры от минус 2,51 до минус 1,13°C (с амплитудой 1,38°C). Минимальные вариации температуры от минус 0,5 до минус 1,72°C (с амплитудой 1,22°C) наблюдались на глубине 28 м (термисторе 13).

По отношению к 2006 г. в 2007 г. в разрезе скважины 4 среднегодовые температуры повысились на всех горизонтах. Среднегодовая температура поверхностного слоя на глубине 2 м (термисторе 1) увеличилась с 2000 по 2007 г. на 1,27°C — с минус 1,91 до минус 0,64°C. На уровне подошвы отвала на глубине 40 м (термисторе 16) за шесть лет наблюдений среднегодовые температуры выросли с минус 2,37 до минус 1,29°C, т.е. на 1,08°C. Максимальное повышение среднегодовой температуры с минус 2,85 до минус 0,23°C было зафиксировано на глубине 12 м (термисторе 9) и составило 2,62°C. Минимальное повышение температуры от минус 1,08 до минус 0,89°C, т.е. на 0,19°C, было зафиксировано в верхней части разреза на глубине 4 м (термистор 3). Среднегодовое значение средней температуры по разрезу за шесть лет наблюдений повысилось от минус 1,88 до минус 0,86°C и составило 1,02°C.

В скважине 5 (см. рис. 3, в) закономерности изменений температурного поля были близки к скважинам 1–3. Среднее значение всех измеренных температур за весь период наблюдений составило минус 0,375°C. При этом была установлена максимальная вариация осредненной по вертикали температуры (6,59°C) от минус 3,75 до плюс 2,84°C. Сезонные изменения температуры по скважине 5 выглядят следующим образом. Максимальные колебания от минус 14,73 до плюс 14,21°C были установлены в приповерхностном слое на глубине 2 м (термисторе 1). Их амплитуда составила 28,94°C. На подошве отвала на глубине 44 м (термисторе 16) температура варьировала от минус 3,70 до плюс 0,01°C (с амплитудой 3,71°C). Минимальные сезонные вариации температуры от минус 0,7 до минус 3,21°C были установлены на глубине 36 м (термистор 14). Их амплитуда составила 2,51°C.

Среднегодовые температуры в разрезе скважины с 2000 по 2007 г. изменились следующим образом. На всех горизонтах глубиной от 2 до 12 м (на термисторах 2–8) было зафиксировано снижение температуры на 0,2–0,8°C. Среднегодовая температура поверхностного горизонта (на термисторе 1) повысилась с 0,36 до 0,66°C, т.е. на 0,3°C. На всех горизонтах глубже 16 м было зафиксировано устойчивое повышение температуры на 0,5–2,0°C. Причем максимальное повышение температуры от минус 2,49 до минус 0,44 (на 2,05°C) установлено в средней части отвала на глубине 24 м (термисторе 11). Среднегодовая температура подошвы выросла на 0,67°C (от минус 1,9 до минус 1,23°C). Осредненная по всему разрезу скважины 5 среднегодовая температура с 2000 по 2007 г. увеличилась от минус 0,89 до минус 0,52°C, т.е. на 0,37°C.

Динамика температурного поля по разрезу

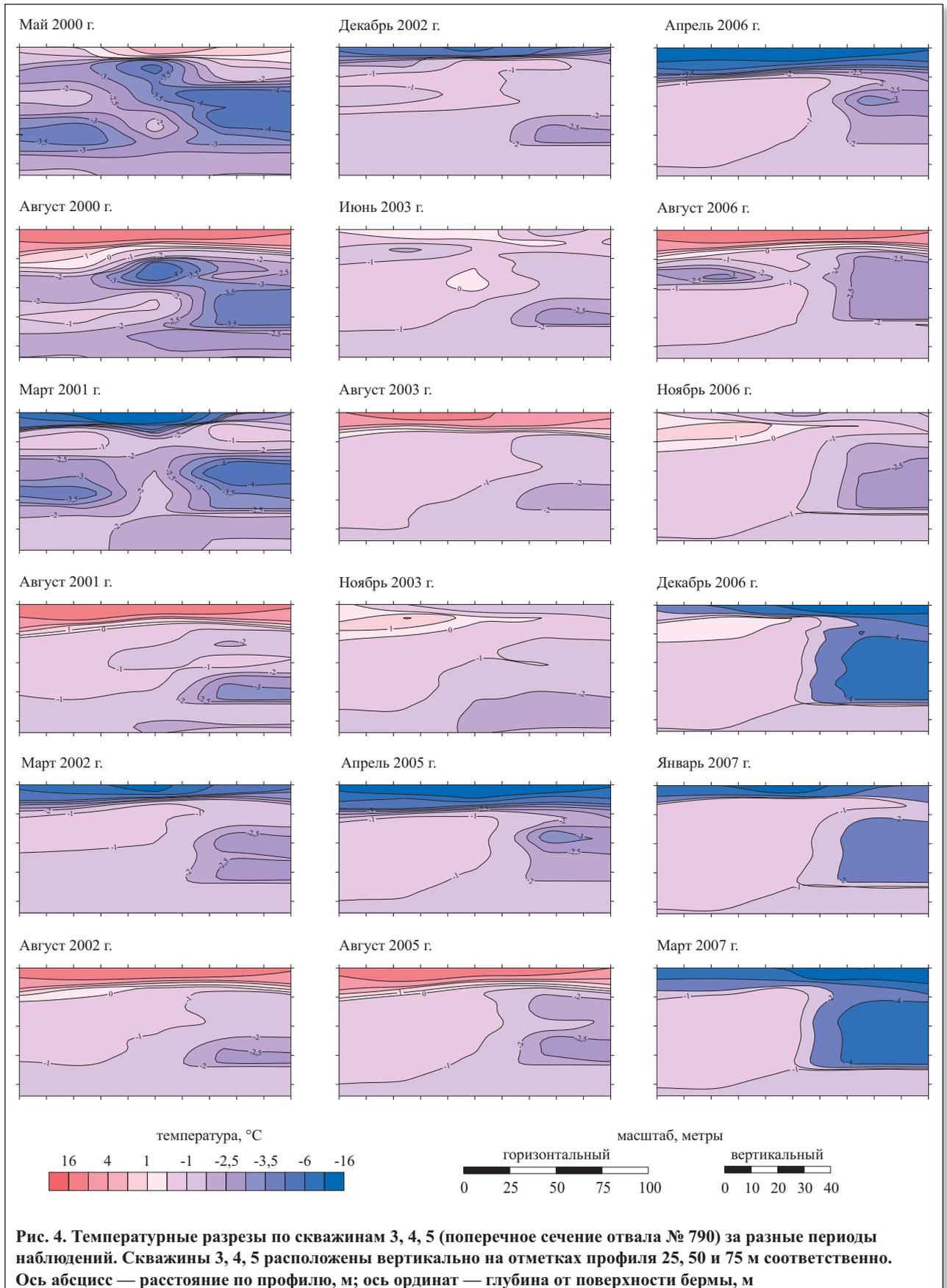
Для отвала № 790 (скважин 3, 4, 5) были построены разновременные разрезы измеренных температур с интервалом два месяца (рис. 4). На них хорошо интерпретируются сезонные аномалии относительно переохлажденных пород, формирующиеся за счет сезонных вертикальных и латеральных тепловых потоков. Значительная роль бокового охлаждения отвала в зимний период и отепления в летний особенно велика на крайних скважинах (3 и 4), в то время как сезонные вариации в центральной части отвала (в скважине 4) менее значительны.

Анализ геотермических разрезов позволяет заключить, что за весь период наблюдений температурное поле, характер и глубина проявления сезонных вариаций менялись значительно и направленно. Первичное и весьма неравномерное температурное поле отвалов характеризовалось наличием отрицательных аномалий линзовидной формы в центральной и боковых частях отвала. Центральная линза, по-видимому, имеет техногенное происхождение и связана со складированием и захоронением переохлажденного материала в зимний период непосредственно в процессе формирования отвала. Эта линза полностью исчезла на протяжении первых трех месяцев наблюдений. Боковые расширяющиеся к бортам отвала «линзы» отрицательных температур связаны с более интенсивным промерзанием крутых бортов отвала, на которых снежный покров полностью отсутствует. Пористое сложение отвала в начальный период способствует хорошему воздухообмену между боковыми частями отвала и атмосферой, иногда сопровождающемуся возникновением адиабатических воздушных потоков.

По мере посттехногенной трансформации практически полностью прекратилось зимнее охлаждение отвала со стороны более пологого левого борта. В то же время усилилось сезонное охлаждение в более крутой правой части со стороны скважины 5. К концу периода наблюдений (с 2006 по 2007 г.) в температурном поле отвала установилась некоторая структура сезонных колебаний. В этой структуре выделяются более стабильная внутренняя (ядерная) зона, поверхностный слой интенсивных сезонных вариаций мощностью до 10 м и боковая нестабильная зона правой части отвала мощностью до 30 м. Такую асимметрию установив-

шегося теплового поля отвала авторы связывают прежде всего с асимметрией его формы и внутреннего строения, которые освещены выше. Правая боковая зона испытывает интенсивное охлаждение вследствие высокой пористости борта отвала и отсутствия на нем снежного покрова.

Из полученных данных становится очевидным, что сезонные тепловые процессы в нижних горизонтах отвалов неритмичны и направлены. Можно заключить, что здесь в целом наблюдается сглаживание температур и исчезновение их сезонных аномалий, отмечавшихся на начальном этапе. Это можно объяснить по-





степенным заполнением порового пространства внутри отвалов мелкоземом и ледяным цементом, что вызывает изменение их теплопроводности (включая конвекцию). О накоплении льда свидетельствуют практически полное прекращение стока и рост ледяного пояса в основаниях старых отвалов.

Динамика годовых амплитуд температуры

Неравномерность (асимметрия) структуры теплового поля рассматриваемого отвала как геоморфологического элемента, очевидно, будет влиять на его дальнейшую динамику — прежде всего на развитие температурного крипа. Известно, что скорость температурного крипа, или термической десерпции, определяется амплитудой годовых колебаний, в то время как скорость криодесерпции определяется количеством переходов через точку замерзания поровой воды [7]. Интуитивно можно предположить, что суммарный вектор поступательно-циклических криогенных движений каждой точки объема тела при отсутствии монолитного течения будет направлен перпендикулярно изолиниям поля годовых амплитуд. При этом мощность динамически активного слоя определяется глубиной кровли нулевых тепловых оборотов.

Для выявления динамики годовых амплитуд температуры были построены разновременные разрезы этого параметра. Он рассчитывался путем суммирования максимальной и минимальной температур, наблюдаемых на каждом термисторе в течение одного года. Из имеющегося ряда данных оказалось возможным построение разрезов амплитуды для первых трех лет наблюдений и последнего года (рис. 5). Годовые амплитуды температур являются производными от абсолютных температур и отражают те же термодинамические процессы в отвалах. Однако графическое отображение данного параметра позволяет более обстоятельно показать существенность термодинамических изменений в разрезе отвала № 790 за период его наблюдений. В начальный период посттехногенной трансформации тепловая структура отвалов характеризовалась линзовидностью и субгоризонтальной слоистостью. К концу периода наблюдений в нем сформировалась структура ядерного типа, в центре которой расположена асимметричная линза с минимальными амплитудами (теплооборотами).

Синергетические процессы в отвалах

Во введении было кратко отмечено возникновение вторичные явлений, связанных с формированием отвалов и техногенными изменениями естественного теплового поля. К этим явлениям, требующим более детального обсуждения, авторы относят:

- изменение гидрологического режима территории и поглощение отвалами стока водосбора ручья Восточный;
- мощные конвективные потоки переохлажденного воздуха во фронтальной части некоторых отвалов, характеризующиеся сезонной и суточной изменчивостью;

- формирование в нижних частях некоторых отвалов цементирующего ледяного горизонта видимой мощностью до 8 м;
- формирование пояса изморози и угнетенной вегетации (рис. 6) шириной около 150 м в пределах естественного лиственничного леса, примыкающего к фронтальной части отвала № 690.

Изменение гидрологического режима и поглощение стока ручья Восточный

До начала формирования отвального полигона Восточный здесь располагался бассейн временного водотока — ручья Восточный (левого притока реки Кубака). Ручей характеризовался относительно небольшой площадью водосбора, не превышающей 1,5 км², хорошо выраженным тальвегом (см. рис. 1) и максимальным расходом во время паводков не более 0,5 м³/с. В его устьевой части был назначена точка гидрологического мониторинга. В процессе освоения месторождения и расширения площади отвалов полигона Восточный общий расход ручья постепенно снижался, несмотря на нормальную обеспеченность осадков. К сожалению, данными о расходах ручья Восточный авторы не рас-

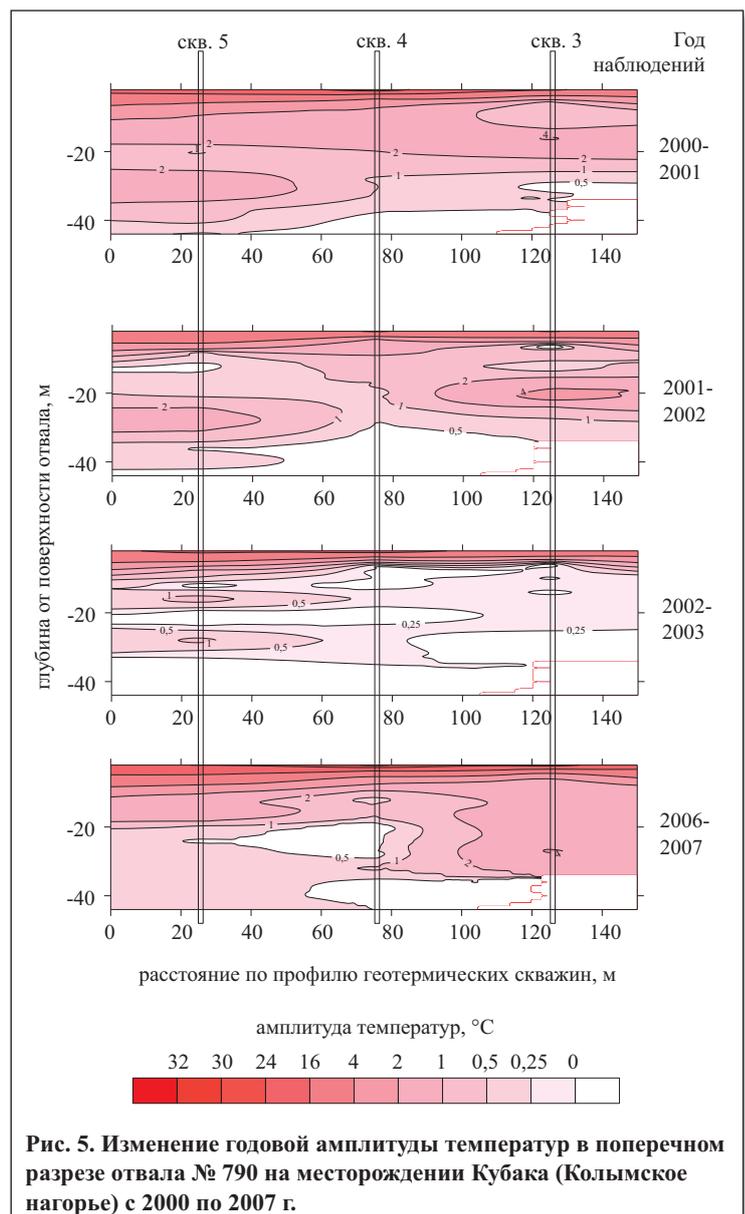


Рис. 5. Изменение годовой амплитуды температур в поперечном разрезе отвала № 790 на месторождении Кубака (Колымское нагорье) с 2000 по 2007 г.

полагают. На основе только визуальных наблюдений летом 2001 г. было установлено прекращение стока и зарастание его русла растительностью.

Уменьшение стока ручья вызвано частичным поглощением отвалами, а также более высокой испаряемостью поверхности отвалов по сравнению с естественным ландшафтом. Высокая поглощающая способность поверхности отвалов с коэффициентом стока не более 0,1–0,3 определяется их пористым строением и отсутствием почвенно-растительного покрова, что обуславливает практически полную инфильтрацию талых снеговых и дождевых вод в массивы отвалов. Значительная часть просачивается внутрь и, достигнув области отрицательных температур, замерзает. Расчетная температура замерзания воды с максимальной из зафиксированных за период наблюдений минерализацией 3,5–4,0 г/л составляет примерно минус 0,2°C.

Установленные в ходе мониторинга однонаправленные (несезонные) изменения температурного поля отвалов и исчезновение температурных аномалий свидетельствуют о заполнении порового пространства цементирующим льдом. Соответственно, прекращение стока может быть косвенно связано с интенсивным накоплением льда внутри отвалов.

Конвективные процессы

Активизация конвективных процессов внутри отвалов обусловлена изначальным неравновесием его теплового поля, пористым сложением и морфологией погребенного рельефа. Роль основного агента конвективного теплообмена принадлежит атмосферному воздуху, который в зависимости от времени года охлаждает (в зимний период) и нагревает (в летний период) отложения отвалов. Движение воздуха осуществляется по поровому пространству пород под влиянием градиентов температуры, давления и влажности. В результате конвекции в массиве отвалов формируются аномальные температурные зоны.

В течение летнего периода массив отвалов прогревается не только сверху, но и снизу. Поступающий в отвалы атмосферный воздух охлаждается и стекает вниз, используя поровое пространство. Наиболее крупные поры и их совокупности формируют своеобразные каналы, выходящие наружу в основании

фронта отвала и образующие подобия устьев. Причем в этих устьях достигается максимальное давление выходящего воздуха. При охлаждении содержащиеся в воздухе пары воды конденсируются в виде льда и заполняют поровое пространство. Таким образом, поровое пространство постепенно заполняется льдом, что осложняет движение воздуха.

Конвективный теплообмен на участках складирования пустых пород характеризуется аномальными визуальными явлениями. В зимний период после охлаждения атмосферного воздуха ниже минус 20 — минус 25°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. Наиболее активно эти процессы протекают на наиболее низких гипсометрических уровнях (отвал № 670). Высота слоя изморози достигает 8,0 м, период ее существования является круглогодичным (с преобразованием изморози к концу лета в натечные ледяные формы).

Поступление холодного воздуха из отвала носит пульсирующий характер, выражающийся в постоянном чередовании и замещении склонового холодного воздуха массами теплого атмосферного воздуха окружающей территории. Это приводит к одновременному таянию сублимационного льда, просачиванию и стеканию воды по поверхности обломков и ее вторичному замерзанию с образованием сплошного слоистого ледяного цемента. Аналогичные связанные с фазовыми переходами воды процессы, вероятно, происходят и внутри отвалов, приводя к постепенному заполнению порового пространства ледяным цементом.

Формирование переохлажденных воздушных потоков

По периферии отвала № 670 полигона Восточный начиная с 2000 г. в течение каждого лета начал отмечаться ярко выраженный пояс угнетенной вегетации естественной растительности. Этот пояс имеет наи-



Рис. 6. Элементы отвала № 670 полигона Восточный: а — общий боковой откос и террасированные боковые бермы; б — сложенная крупными глыбами краевая часть фронтального откоса и примыкающая зона угнетенной вегетации



большую ширину около 150 м в тальвеговой части долины ручья Восточный. Здесь же в основании отвала наблюдались наиболее мощные выходы льда (около 8 м) и интенсивные потоки переохлажденного воздуха с температурами ниже минус 10 — минус 15°C в летний период. Для исследования данного процесса в июле 2002 г. были проведены измерения температуры и влажности воздушных потоков с использованием психрометра Асмана. Замеры выполнялись по двум профилям (см. рис. 1) на высоте 0,5–1,0 м от поверхности земли и в воздушных полостях пород у подножий отвалов. Результаты измерений приведены на рис. 7.

Было установлено, что скорость перемещения воздуха в поровом пространстве и на выходах в атмосферу зависит от абсолютных значений градиентов и составляет, по натурным оценкам, в летний период (в конце июля) на уровне подошвы отвала № 670 не менее 5 м/с. При этом температура выдавливаемого из отвала холодного воздуха достигает минус 10°C и ниже. Интересным является то, что ни в одной из скважин такие низкие температуры не фиксировались на всем протяжении геотермического мониторинга. Вместе с тем столь низкие температуры выходящего из под отвала воздуха могли бы свидетельствовать о значительных «запасах холода» в его массиве.

Скорость воздушных потоков и их температурные градиенты достигают максимума в наиболее жаркое время дня. В утренние часы при температуре окружающего воздуха плюс 18°C температура выходящих потоков не опускалась ниже минус 5 — минус 6°C. Вечером при температуре окружающего воздуха плюс 29 — плюс 30°C температура отдельных воздушных струй опускалась до минус 17°C. Таким образом, утренний градиент составил около 23°C, а вечерний — примерно 45°C. Причем скорость потока переохлажденного воздуха в вечернее время была существенно более высокая. О мощности и уникальности охарактеризованных тепловых процессов может свидетельствовать и то, что бутылка с питьевой водой объемом 1 л, помещенная в устье выходящего холодного воздушного потока, полностью замерзала за 15 минут.

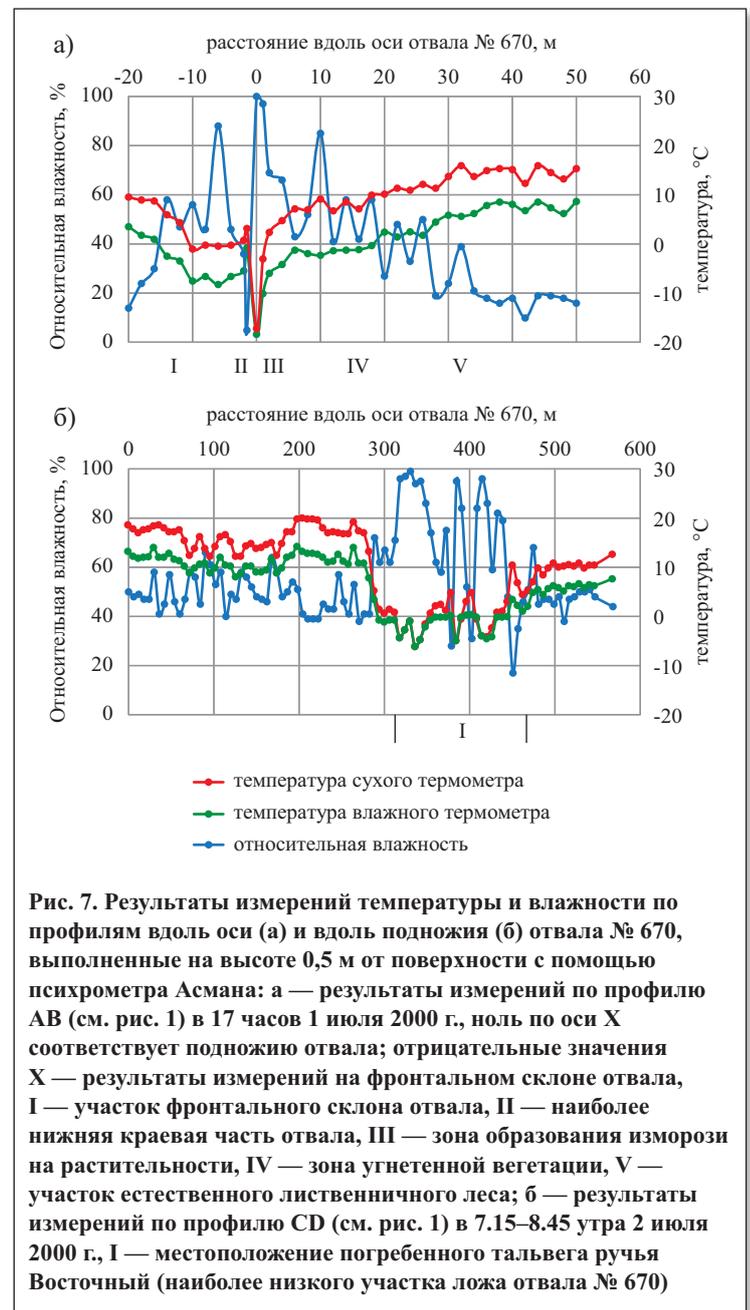
На температурно-влажностном профиле (см. рис. 7, б) отчетливо интерпретируется размер зоны активных потоков холодного воздуха — около 20 м. Она приурочена к наиболее низкому участку ложа отвала — погребенному тальвегу ручья Восточный. Причем в этой зоне отмечено несколько изолированных участков скопления выводных устьев. Мы предполагаем, что концентрация холодных потоков в пределах погребенного тальвега объясняется его морфологией и большей проницаемостью для воздушных потоков.

На участке выхода переохлажденных потоков формируется подвижная граница взаимодействия холодного воздуха отвалов и нагретого атмосферного. Положение этой границы постоянно меняется. Наибольшая скорость воздушных потоков и выхолаживания фронта отвала наблюдается в жаркую летнюю погоду во второй половине дня. В это же время пояс инея на примыкающем к фронту отвала растительном покрове расширяется до 10–15 м. Ночью и в пасмурную прохладную погоду скорость воздушных потоков умень-

шается, пояс инея сокращается и даже исчезает, а граница образования сублимационного льда смещается вглубь отвала.

Мы предполагаем, что конвективные воздушные потоки связаны с различной плотностью холодного воздуха переохлажденных отвалов и теплого воздуха окружающей среды. Это явление отмечалось и ранее в техногенных и природных геологических объектах (такие потоки иногда именуют «сушенцами»). Однако на отвалах месторождения Кубака оно приняло весьма масштабный характер.

Процессы конвективного воздухообмена, с одной стороны, указывают на термодинамическую неустойчивость отвалов на начальном этапе их посттехногенной трансформации. С другой стороны, они направлены на стабилизацию отвалов, поскольку приносят в них большое количество влаги. Это способствует ускорению заполнения порового пространства льдом, что, в свою очередь, снижает активность конвективных потоков.



Заключение

Мониторинг отвалов месторождения Кубака в течение семи лет позволил выявить сложный характер протекающих в них постгенетических геотермических процессов и сопровождающих их вторичных явлений. Было установлено следующее.

Специфика посттехногенной трансформации отвалов определяется их исходным грубообломочным составом и особенностями формирования (складирования). Процессы гравитационной сортировки при формировании террасированного отвала приводят к образованию высокопористого проводящего горизонта в его основании. Террасовидная (асимметричная) морфология и аномальная мощность (до 59 м) сформированных отвалов месторождения Кубака сближают их с некоторыми природными грубообломочными образованиями — каменными глетчерами. Погребенный под отвалами исходный рельеф, включая долину и тальвег ручья Восточный, способствует формированию воздушных и водных потоков внутри некоторых отвалов.

Наиболее объективные выводы о динамике температурного поля можно сделать на основании геотермических разрезов отвала № 790. На начальном этапе посттехногенной трансформации тепловое поле этого отвала было крайне неустойчивым. В нем возникали отрицательные и положительные квазиритмические аномалии. Вместе с тем за семь лет наблюдений средняя температура отвала не только не понизилась, а повысилась с 0,37 до 1,02°C. Поэтому изначальный тезис о «криогенной консервации» пород отвалов путем их естественного промерзания авторам представляется несостоятельным.

Установленные закономерности изменения температуры отвалов сводятся к выравниванию температурного поля и формированию структуры ядерного типа, в которой форма изотерм в некотором приближении повторяет форму поверхности отвала. Отчетливо зафиксировано повышение среднегодовой температуры большей части отвала и особенно его центральной (ядерной) зоны. Максимальное повышение температуры от минус 2,85 до минус 0,23°C было зафиксировано в центре отвала (в скважине 4) на глубине 12 м (термисторе 9) и составило 2,62°C. В боковых частях отвала максимальное повышение от минус 3,89 до минус 2,57°C наблюдалось на глубине 24 м (в скважине 3) и составило 1,32°C. В правой части отвала (в скважине 5) максимальное понижение среднегодовой температуры от минус 2,49 до минус 0,44°C было отмечено на той же глубине (24 м) и составило 2,05°C. Повышение температуры подошвы отвала № 790 также было весьма значительным (1,0–2,4°C). Понижение среднегодовой температуры отвала было выявлено только на некоторых термисторах поверхностного слоя до глубины 4–10 м и составило менее 1°C.

Структурные изменения сезонной динамики теплового поля отвала № 790 хорошо иллюстрируются геотермическими разрезами годовой амплитуды (см. рис. 5), на которых наблюдается появление ядра с минимальными ее значениями в центре отвала. При этом общая структура теплового поля становится более равномерной и упорядоченной.

Возникающие при промерзании отвалов вторичные (синергетические) процессы направлены на стабилизацию их изначальной термодинамической неравновесности. Причем эта неравновесность связана как с «захоронением» в ходе отсыпки отвалов некоторых тепловых аномалий, так и со структурно-вещественным составом. На месторождении Кубака наибольшее развитие получили циркуляционные потоки переохлажденного воздуха, приводящие к интенсивному образованию сублимационного и конжеляционного типов льда внутри отвалов в летний период. Отчасти их можно объяснить конвекционными механизмами. Однако происхождение крайне низких температур этих потоков (минус 15°C и ниже) требует, вероятно, другого объяснения.

Снижение расхода и прекращение стока ручья Восточный, которое авторы связывают с поглощением осадков в телах отвалов, также является специфической реакцией, требующей дополнительного исследования.

Все рассмотренные процессы, в т.ч. визуально наблюдаемые пояса льда мощностью 5–8 м в нижних частях отвалов, прямо и косвенно указывают на постепенное преобразование структурно-вещественного состава отвалов в ходе их посттехногенной трансформации. Конечным результатом этой трансформации будет формирование массивного ледово-грунтового тела.

Полученные материалы позволяют несколько более широко взглянуть на выполненный мониторинг отвалов. Само их создание и дальнейшее развитие можно рассматривать в рамках задач экспериментальной геоморфологии. Сходство литологических, геоморфологических и морфоклиматических условий залегания природных каменных глетчеров и отвалов месторождения Кубака дает основание провести аналогию между ними и воспользоваться известными реологическими моделями для прогноза пластического течения отвалов. ❄

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 11-05-0046-а, 12-05-98507-р_восток_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галанин А.А., Моторов О.В., Замоц М.Н. Техногенные каменные глетчеры в районах освоения коренных месторождений Северо-Востока // Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2006. № 1. С. 17–28.
2. Гребенец В.И., Керимов А.Г. Изменения характера движения крупнейшего техногенного каменного глетчера // Криосфера Земли. 1998. Т. 2. № 2. С. 38–42.
3. Гребенец В.И., Титков С.Н. Инженерно-геологические риски, связанные с формированием техногенных каменных глетчеров // Инженерная геология. 2006. № 11. С. 33–37.
4. Горбунов А.П., Северский Э.В. Скорости движения и деформации каменных глетчеров // Криосфера Земли. 2010. Т. 14. № 1. С. 69–75.
5. Замоц М.Н., Моторов О.В., Павлов Б.А. Генезис, характеристика и свойства крупнотоннажных отходов горнодобывающих предприятий Северо-Востока России // Колыма. 2003. № 4. С. 42–47.
6. Моторов О.В., Замоц М.Н., Галанин А.А. Образование техногенных каменных глетчеров при разработке коренных месторождений в условиях криолитозоны // Горный журнал. 2007. № 4. С. 25–29.
7. Шайдеггер А.Е. Теоретическая геоморфология. М.: Прогресс, 1964. 450 с.