Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2023. Т. 78. № 4. С. 107–124

УДК 911.2 + 551.4.08

АНТРОПОГЕННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ РЕЛЬЕФА НОРИЛЬСКОГО ПРОМЫШЛЕННОГО РАЙОНА

Г.А. Кажукало[1], Е.А. Еременко[2], Ф.А. Романенко[3]

[1–3] *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геоморфологии и палеогеографии*

[1] *Магистрант; e-mail: kazhukaloga@gmail.com*
[2] *Доц., канд. геогр. наук; e-mail: eremenkoeaig@gmail.com*
[3] *Вед. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: faromanenko@mail.ru*

Выполнены количественная оценка масштабов и типизация последствий антропогенной трансформации рельефа Норильского промышленного района. Работа основана на результатах экспедиционных геоморфологических исследований в 2021 г., дешифрирования и анализа материалов дистанционного зондирования и цифровых моделей рельефа. Установлено, что общая площадь участков прямой трансформации рельефа при освоении составила около 122,4 км^2, а косвенной – 23,6 км^2. Объем антропогенных форм рельефа достигает около 1,8 млрд м^3, при этом 93% площади и 72,6% объема прямых трансформаций рельефа приходится на аккумулятивные формы. Проведена типизация антропогенного рельефа, установлено, что наибольшую площадь занимают насыпи под промышленную застройку и хвостохранилища, а наибольший объем характерен для склоновых отвалов. Косвенная трансформация рельефа выражается в активизации гравитационных процессов, линейной эрозии, суффозии, термокарста, пучения и дефляции. Наиболее опасно для объектов инфраструктуры массовое смещение склоновых отвалов оползнями или каменными глетчерами. Обособленные ареалы косвенных трансформаций распространены в основном на озерно-аллювиальной низменности и в днищах речных долин. Среди них наибольшую площадь (до 20 км^2) занимают участки речных долин, затронутые разливами нефтепродуктов и утечками из хвостохранилищ. Установлено, что аккумуляция загрязняющих веществ в долинах рек Норильского промышленного района происходит в пределах внутренних дельт и наледных полян, на участках уменьшения уклонов продольного профиля. Выделены три этапа антропогенного освоения территории (I – 1920–1953 гг.; II – 1953–1986 гг.; III – 1986–2021 гг.), причем наиболее существенно площадь антропогенного рельефа прирастала в 1953–1986 гг. Средняя скорость ее приращения за последние 36 лет составила 0,81 км^2/год. Наибольшие темпы приращения площади характерны для районов Кайеркана и Талнаха, что связано с продолжающейся горнодобычей.

Ключевые слова: Норильск, антропогенный рельеф, освоение Арктики, техногенные грунты, антропогенное воздействие, экологическая геоморфология, загрязнение нефтепродуктами

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.4.10

ВВЕДЕНИЕ

Норильский промышленный район (НПР) расположен в Красноярском крае на стыке Северо-Сибирской низменности и северо-западной части Среднесибирского плоскогорья (плато Путорана) [Геоморфологическое…, 1980]. В границах НПР расположен г. Норильск (численность населения на 2021 г. – 182 496 человек [Управление…, 2021]). Градообразующим предприятием является Заполярный филиал ПАО «ГМК “Норильский никель”», включающий в себя шесть ныне действующих рудников и шахт, две обогатительные фабрики и два металлургических завода. Область антропогенного освоения разделена р. Норильской на два рудных района – Норильский и Талнахский. В пределах НПР ведется добыча угля, карбонатных пород и медь-никель-платиновых сульфидных руд, причем запасы никеля, палладия, платины и кобальта на норильских месторождениях оцениваются соответственно в 13, 43, 25 и 5,8% от общемировых [Бортников, 2015].

За почти столетнюю историю горнодобычи территория НПР испытала существенные антропогенные трансформации рельефа и нередко характеризуется как наибольший источник техногенного загрязнения в пределах арктической зоны России [Бутюгин, Гулан, 2005]. Длительное и комплексное освоение НПР привело к формированию наибольших по площади (в российском секторе Арктики) ареалов *прямой трансформации рельефа*, причем в сравнении с Воркутой и Нижним Приобьем [Еременко и др., 2020; Еременко и др., 2021] хозяйственная деятельность здесь затронула не только равнины различного генезиса, но и низкогорья.

Цель исследования – качественная и количественная оценка масштабов прямой и косвенной трансформации рельефа при освоении, выявление закономерностей распространения антропогенного морфолитогенеза, а также типизация антропогенного рельефа НПР. Представленное исследование продолжает цикл работ [Бредихин и др., 2020; Еременко и др., 2020; Еременко и др., 2021], направленных на выявление геоморфологических и экологических последствий горнопромышленного освоения Арктики.

Хозяйственное освоение территории НПР протекает в суровых условиях Крайнего Севера, что сказывается как на специфике изменения рельефа для нужд природопользования, так и на спектре опасных и неблагоприятных природных процессов, возникающих как следствие вмешательства человека в функционирование природных экосистем. Естественный рельеф территории предопределен ее положением в зоне контакта низменной равнины и глубоко расчлененного горного массива. К структурам Норильской и Хараелахской мульд приурочен низкогорный среднерасчлененный структурно-денудационный рельеф северо-западных отрогов плато Путорана (300–684 м над ур. моря). К Норильско-Хараелахскому разлому приурочены основные месторождения сульфидоносных медно-никелевых руд [Спиридонов, 2010]. К западу и северо-западу поверхность переходит в пологонаклонную денудационную равнину высотой 150–300 м, приуроченную к Вологочанской мульде. Рельеф повторяет неровности кровли дочетвертичных пород, мощность четвертичных отложений не превышает 2–3 м. Для долин характерны порожисто-водопадные русла, чередование структурных сужений, обусловленных выходами скальных пород и внутренних дельт шириной до 400–500 м. С ЮВ на СЗ изучаемую территорию пересекает Хантайско-Рыбнинская троговая долина (28–150 м над ур. моря), борта которой осложнены ледниковыми формами, образованными в позднем плейстоцене [Сарана, 2017]. В долину вложена осложненная термокарстовыми котловинами западинно-грядовая озерно-ледниковая (Вальковская) равнина (60–110 м над ур. моря), сложенная глинистыми и валунно-галечниковыми осадками мощностью до 50 м [Государственная геологическая…, 2016], которая через неясно выраженный уступ переходит в бугристо-западинную озерно-аллювиальную (Аяклинскую) низменность.

НПР расположен в зоне субарктического климата. В его равнинной части среднегодовые температуры воздуха составляют –9,4°С, а годовая амплитуда температур может превышать 80°С [Научно-прикладной справочник…, 1990]. Среднегодовые значения суммы осадков колеблются от 400 до 700 мм. Мощность многолетнемерзлых пород изменяется от 20 до 400 м [Демидюк, 1989], достигая в г. Норильске 150 м. В пределах низменностей многолетняя мерзлота имеет массивно-островное распространение [Шевелева, Хомичевская, 1967]. Средняя мощность деятельного слоя по данным многолетних наблюдений составляет 90–100 см [Керимов и др., 2018]. На низменностях преобладают ландшафты кустарничково-мохово-лишайниковой тундры и осоково-гипновых болот в составе полигонально-бугристых комплексов [Телятников, Пристяжнюк, 2014]. На структурно-денудационных склонах встречаются лесотундровые редколесья из ольховника, ельника, а также куртины можжевельника сибирского. На южном склоне Хараелахских гор распространены ландшафты угнетенной лиственничной северной тайги. Влияние воздушно-газового шлейфа предприятий и вырубок привело к полной трансформации растительного покрова (до широкомасштабного освоения на территории НПР преобладала северо-таежная растительность) [Севастьянов и др., 2014; Телятников, Пристяжнюк, 2014].

Несмотря на практическую значимость оценки антропогенной трансформации рельефа, на территории НПР подобные исследования практически не проводились. Большая часть публикаций, касающихся изменений окружающей среды, посвящена изменениям климата, характера растительности, загрязнению почв, подземных и поверхностных вод, деградации мерзлоты или ландшафтов [Гребенец, 2007; Гребенец, Исаков, 2016; Телятников, Пристяжнюк, 2014; Железный и др., 2022]. В ходе мелкомасштабных исследований антропогенного рельефа Арктики и эколого-геоморфологических аспектов природопользования в криолитозоне (например, [Бредихин и др., 2020; Эколого-геоморфологический анализ…, 2020]) количественная оценка масштабов преобразования рельефа человеком в пределах НПР не проводилась. Таким образом, оценка хронологии и типов трансформации рельефа НПР в ходе освоения – актуальная задача, решение которой необходимо для разработки стратегии эффективного природопользования в регионе.

История освоения исследуемой территории насчитывает несколько тысяч лет – в верховьях р. Пясины археолог Л.П. Хлобыстин описал стоянки людей бронзового века. Судя по остаткам орудий для плавки меди, они были первыми, кто обнаружил месторождения Норильских и Хараелахских гор [Урванцев, 1969]. Археологические раскопки рудного двора Мангазеи показали, что использованная руда содержала никель и платиноиды, что характерно для сульфидоносных месторождений Норильского района [Додин, 2002]. По-видимому, еще в XVI–XVII вв. Норильские месторождения

использовались мангазейскими рудознатцами и вывозились через Дудинку. Первые известия об обнаружении угленосных горизонтов встречаются в отчете экспедиции А.Ф. Миддендофра на Таймыр в 1843 г. [Севастьянов и др., 2014]. Во второй половине XIX в. купцы Сотниковы пытались организовать добычу угля и медной руды [Урванцев, 1981]. В 1866 г. Ф.Б. Шмидт осмотрел медное месторождение горы Рудной, и к концу 1868 г. было получено около трех тонн черновой меди [Додин, 2002].

Начало широкомасштабному горнопромышленному освоению НПР положили экспедиции Н.Н. Урванцева в 1919–1934 гг. [Додин, 2002]. В первые два года им были выявлены крупные месторождения угля и несколько шлиров богатых медно-никелевых руд [Урванцев, 1981]. Позднее было установлено наличие палладия и платины, что позволило сделать вывод о перспективности Норильских и Хараелахских гор на медно-никелевое оруденение [Додин, 2002]. Освоение месторождений в пределах горы Рудной, ручьев Угольного и Медвежьего началось в 1920 г. Наличие залежей руды и угля обусловило возможность создания крупного металлургического комплекса полного цикла. В 1935 г. СНК СССР принял решение о строительстве Норильского комбината и поселка Норильск силами заключенных [Севастьянов и др., 2014], началась широкомасштабная трансформация рельефа на территории месторождения «Норильск-1» и к югу от оз. Долгого («старый город» Норильска).

Использование свайного фундирования в строительстве (под руководством М.В. Кима [Севастьянов и др., 2014]) позволило вовлечь в освоение низменные равнины к северу от Норильских гор. Параллельно со строительством Норильска был основан угольный поселок Кайеркан. В 1960 г. открыто Талнахское месторождение (шахта «Маяк» к востоку от р. Талнах), а затем и Талнахский рудный район [Додин, 2002]. В 1964 г. был основан одноименный поселок, а к 1982 г. были возведены четыре шахтных комплекса из пяти ныне существующих, Талнахская обогатительная фабрика, Надеждинский завод, хвостохранилище «Лебяжье» и другие крупные промышленные объекты.

В 1970–1980 гг. численность населения в пределах НПР росла, поэтому в 1986 г. началось строительство поселка Оганер и пятого рудника Талнаха – «Скалистого». Однако в постсоветский период многие строительные проекты так и не были реализованы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В основу исследования положены результаты анализа фондовой и опубликованной научной литературы, дешифрирования разновременных космических снимков. В августе 2021 г. на территории месторождения «Норильск-1», в окрестностях Надеждинского металлургического завода, Кайеркан-ского угольного разреза, селитебной зоны районов Центральный, Талнах и Кайеркан выполнены экспедиционные геоморфологические работы. Они включали крупномасштабную (1:50 000) геоморфологическую съемку антропогенного рельефа, при которой фиксировались геоморфологическая позиция, морфологические параметры антропогенных форм (длина, ширина, высота, плановые очертания, крутизна и характер продольного профиля склонов), геокриологическое строение участка, состав естественных и антропогенных отложений, а также спектр антропогенно спровоцированных геоморфологических процессов. На речных долинах, подвергшихся загрязнению нефтепродуктами, исследовались характер продольного и поперечного профилей долины (в том числе с помощью высокоточного ГНСС-приемника на участке аварии на ТЭЦ-3 в мае 2020 г.), геоморфологическая позиция зон остаточного загрязнения нефтепродуктами, выполнено ландшафтно-геокриологическое профилирование.

Для определения морфометрических параметров крупных комплексов антропогенных форм, не обследованных в ходе полевых работ (территории действующих карьеров, шахт), использовалась цифровая модель рельефа ArcticDEM [Arctic DEM Explorer, 2021] с пространственным разрешением 2 м.

Для выявления участков, подверженных антропогенным трансформациям рельефа, проведено дешифрирование космических снимков из открытых источников, выделены дешифровочные признаки антропогенных форм рельефа и ареалов косвенной трансформации. Для оценки скорости приращения площади антропогенного рельефа выполнено дешифрирование снимков за 1985 и 2021 гг. в среде Google Earth [Maxar technologies, 2021]. Бóльшая часть антропогенных форм рельефа уверенно дешифрируется на снимках в естественных цветах за счет их большего (в сравнении с естественными формами) подобия простым геометрическим фигурам, а также из-за отсутствия растительного покрова и характерных текстурных особенностей (следы техники и др.). Тем не менее в ряде случаев без полевого обследования отличить антропогенные формы рельефа друг от друга оказалось затруднительно. Наибольшие сложности представляет дешифрирование границ полигонов ТБО, которые определяются лишь по скоплению руин строений, металлоконструкциям и строительному мусору.

На основе материалов полевых работ и результатов анализа данных дистанционного зондирования установлены участки прямой и косвенной транс-

формации рельефа, определены площади и объём антропогенных форм рельефа, выявлена их геоморфологическая позиция, а также составлены крупно- и среднемасштабные (1:75000 и 1:250000) карты антропогенной трансформации рельефа НПР. Анализ площадей и объемов антропогенной трансформации рельефа проведен с помощью инструментов программного комплекса ArcGIS 10.5.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сущность ***прямых трансформаций рельефа*** заключается в создании антропогенных и изменении естественных форм и элементов рельефа. Составлена классификация антропогенных форм (табл. 1), основанная на различиях их морфологии, геологического строения и функционального назначения. Генетический *тип* антропогенного рельефа разделен на два *подтипа* – аккумулятивный (положительные формы рельефа, образованные путем переотложения пород) и денудационный (отрицательные формы рельефа, образованные при изъятии пород), а также на *группы* (линейные и площадные формы рельефа). Далее все формы рельефа разделены на *подгруппы* исходя из их функционального назначения и *виды* (по морфологии). Составленная классификация демонстрирует чрезвычайное морфологическое разнообразие антропогенного рельефа НПР, связанное с продолжительным комплексным освоением. При этом районам с разным типом природопользования свойственен определенный набор видов антропогенных форм и, как следствие, спектр косвенных трансформаций рельефа.

Различия в морфологии в пределах даже одной функциональной подгруппы могут быть существенны. К примеру, *отвалы шахт и карьеров* разделены на три вида (см. табл. 1; рис. 1, А, Б), так как различаются не только морфометрическими параметрами, но также составом слагающих отложений и особенностями современной морфодинамики. Отвальные поля в южной части долины руч. Медвежьего сложены более крупнообломочным материалом (более 30% объема – глыбы), внутрь них попадает снег, лед, уголь, а высокая пористость позволяет проникать и дождевым осадкам, в результате чего отвал становится льдистым [Гребенец, Керимов, 1998]. В 1992 г. отвал «Пост-1», расположенный в долине руч. Медвежьего, начал движение по типу «каменного глетчера» вниз по склону и за несколько лет продвинулся более чем на 500 м. «Валы выпирания» *техногенного каменного глетчера*, выделенного как отдельный вид антропогенных форм, разрушили автодорогу и трубопроводы, проложенные в днище долины руч. Медвежьего.

Общая площадь территории, затронутой прямой трансформацией рельефа в пределах НПР, составляет 113,5 км^2 (с учетом ж/д и автодорожных насыпей – 122,4 км^2). По занимаемой площади и объему преобладают аккумулятивные антропогенные формы (93 и 72,6% соответственно). Причина этого в большом объеме пустой породы, которая изымается при проходке открытых и подземных выработок. Объем аккумулятивных форм существенно превышает объем денудационных, так как, с одной стороны, складируемый обломочный материал имеет более высокую пористость в сравнении с породами в естественном залегании, с другой стороны, значительные по объему подземные выработки не учтены в полученном суммарном объеме денудационных форм (их общая протяженность превышает 800 км [Скачков, 2005]).

Более половины (53,83%) площади антропогенных форм рельефа приурочено к ареалу структурно-денудационного рельефа, так как именно в его контурах расположены медно-никелевые, угольные и карбонатные месторождения, а отходы горной добычи, чаще всего, складируются в непосредственной близости от района добычи (рис. 2, 3; табл. 2).

Прямая трансформация рельефа сопровождается преобразованием вещественного состава поверхностных пород. На основе классификации [Афонин и др., 1990] выделено три класса антропогенных отложений – *новообразованные, переотложенные* и *измененные*. В большей части случаев одной подгруппе или виду антропогенного рельефа соответствует определенный класс отложений. Литологический состав антропогенных отложений принципиально отличается от такового у естественных грунтов, что предопределяет закономерную смену спектра преобладающих геоморфологических процессов на участках антропогенной трансформации рельефа.

К классу *новообразованных* отнесены отложения, вещественный состав и структурно-текстурные особенности которых не формируются в естественных условиях (твердые коммунальные и бытовые отходы, строительный мусор (кирпичная крошка, бетон) и отходы горно-обогатительной промышленности (металлургический шлак, золошлак, шламы)). Они слагают насыпи под промышленную застройку и ж/д насыпи, полигоны ТБО, поверхности площадок хвостохранилищ и прудов-отстойников, а также золоотвалы. Крупнодисперсные новообразованные отложения (кирпичная крошка, шлакоблоки) слабо подвержены воздействию экзогенных процессов. Тонкодисперсный субстрат (металлургический шлам, зола) обладает низкой противоэрозионной устойчивостью, поэтому сложенные им антропогенные формы подвержены эрозии, суффозии и дефляции.

Таблица 1

Морфология антропогенного рельефа НПР и характеристика косвенной трансформации рельефа

Прямые трансформации рельефа				
Подгруппы и виды форм		Морфология рельефа и слагающие отложения	Площадь*, км^2	Объем*, тыс. м^3
1		2	3	4
1. Подтип аккумулятивных форм				
1.1. Группа площадных форм				
1.1.1. Отвалы	1.1.1.1. Крупные отвальные поля шахт и карьеров	Изометричные или линейно-вытянутые в плане, с куполообразной вершинной поверхностью, высота 8–30 м, крутизна склонов от 10 до 30°. Сложены щебнисто-дресвяным и алеврито-песчаным материалом пород вскрыши	14,3	156 400
	1.1.1.2. Склоновые отвалы шахт и карьеров	Фестончатые, языковатые в плане. Фронтальный склон имеет высоту до 60–70 м, крутизну 35–36°. Вершинная поверхность пологонаклонная (3–10°). Максимальная высота – 110 м, ширина – 800 м. Сложены вскрышными породами – щебнем, дресвой и глыбами с песчаным-алевритовым или воздушным заполнителем	18,0	480 000
	1.1.1.3. Техногенный «каменный глетчер»	Образуются из склоновых отвалов. По морфологии отличаются выположенным фронтальным склоном, наличием вала выпирания шириной до 500 м и вертикальных просадок (трещин) в тыловой части глубиной до 5–7 м	1,2	46 400
1.1.2. Насыпи (отсыпки)	1.1.2.1. Насыпи под селитебную застройку	Мощность до 2–3 м, ширина до сотен метров. Сложены преимущественно материалом песчано-гравийной размерности	9,0	49 800
	1.1.2.2. Насыпи под промышленную застройку	Мощность до 6–8 м, ширина до первых километров. Материал неоднороден и представлен щебнисто-дресвяной фракцией с песчано-суглинистым заполнителем и строительным мусором, шлаком, кирпичной крошкой	29,5	167 700
1.1.3. Площадки полигонов ТБО		Высота до 7–10 м, крутизна склонов до 10°. Сложены строительным мусором, остатками транспортных средств и бытовой электроники. Вершинная поверхность слабобугристая	0,5	3400
1.1.4. Насыпи промышленного назначения	1.1.4.1. Хвостохранилища	Замкнутые положительные формы рельефа, состоящие из насыпной оградительной дамбы и площадки-накопителя. Сложены тонкообломочным материалом с мерзлым противофильтрационным ядром. Высота насыпной дамбы – от 5 до 40 м, крутизна внешних склонов – 20–25°	Не менее 24,7	Не менее 392 000
	1.1.4.2. Площадки прудов-отстойников	Морфографические характеристики аналогичны 1.1.4.1, однако высота дамб и мощность площадок существенно меньше – до 6 и 4 м соответственно, а крутизна внешних склонов может достигать 30–35°	7,8	54 200

Продолжение таблицы 1

1		2	3	4
1.2. Группа линейных форм				
1.2.1. Насыпи линейные	1.2.1.1. А/д насыпи	Высота до 3–5 м, крутизна откосов до 25–30°, средняя ширина по подошве – 10–15 м. Сложены песчано-гравийным материалом	4,5	12 100
	1.2.1.2. Ж/д насыпи	Высота до 12–15 м, крутизна откосов до 25–40°, средняя ширина по подошве – 30 м Сложены металлургическим шлаком, шламом, обломками коренных пород различной крупности	3,3	13 100
2. Подтип денудационных форм				
2.1. Группа площадных форм				
2.1.1. Карьеры	2.1.1.1. Действующие	Изометричные денудационные формы в виде усеченного конуса, глубина изменяется от 2–3 (карьеры по добыче ПГС) до 330 м (карьер «Медвежий ручей»). Ширина по бровкам – от первых десятков м до первых км. Склоны осложнены уступами и бермами, крутизной от 20° до отвесных	2,7	383 300
	2.1.1.2. Частично или полностью отработанные	Глубина – до 40–50 м, крутизна склонов – от 25° до отвесных. В днище карьеров – скопления отвальных полей высотой до 10–15 м	5,8	102 500
2.2. Группа линейных форм				
2.2.1. Дренажные канавы		Ширина по бровкам до 25–30 м, глубина до 4–5 м, крутизна склонов (в среднем) 15–20°	Не менее 0,5	Не менее 1600
2.2.2. Выемки автомобильных и железных дорог		Ширина по днищу – 4–5 м, по бровкам – до 15–20 м (распространены преимущественно на промышленных и старых селитебных территориях)	Не менее 0,6	Не менее 1200
Косвенные трансформации рельефа				
Участки антропогенного воздействия		**Характер трансформации рельефа и комплекса геоморфологических процессов**		
Селитебные территории		Перераспределение поверхностного стока, растепление многолетнемерзлых пород, новообразование таликов, подтопление, просадочные деформации, локальные проявления пучения и термокарста		
Площадки обогатительных фабрик, шахт, заводов и других промышленных объектов		Поверхностный и подземный сток зарегулирован дренажными каналами. Характерно новообразование техногенных таликов, просадочные деформации, термоэрозия, суффозия. Буровзрывной метод добычи нередко приводит к интенсификации наледообразования на прилегающих территориях за счет увеличения трещиноватости скальных пород		
Карьеры (в т. ч. карьеры-прорези)		Активизация склоновых процессов и эрозии на бортах карьеров – обвально-осыпных, оползневых, солифлюкции, перераспределение поверхностного стока, заболачивание и подтопление днища карьера		
Отвальные поля медно-никелевых месторождений		У бровок отвалов повсеместно наблюдается заболачивание, развитие форм линейной эрозии. Обвально-осыпные процессы и движение курумов на склонах отвалов, в отдельных случаях – массовые смещения грунта по типу оползня или каменного глетчера		

Окончание таблицы 1

1	2	3	4
Золоотвалы, отвальные поля угольных разрезов, карьеров по добыче ПГС, свалки ТБО	Активизация термокарста и заболачивания (в т. ч. с образованием озер), делювиального смыва и линейной эрозии, склоновых процессов (в т. ч. солифлюкции)		
Хвостохранилища и отстойники	Растепление многолетнемерзлых пород из-за высокой температуры поступающего в резервуар шлама. Наблюдается активизация эрозионных процессов, термоэрозии, термокарста, морозобойного растрескивания, суффозии. На прилегающих территориях, в прибровочных частях насыпных дамб – подтопление и заболачивание		
Участки прокладки авто- и железнодорожных путей	В прибровочных частях насыпей наблюдается активизация криогенных процессов – термоэрозии, термокарста, неравномерного пучения, новообразование таликов. На участках перехода через долины рек и ручьев – заболачивание и подтопление, формирование внутренних дельт. На склонах насыпей развиты оползневые и обвально-осыпные процессы, солифлюкция; в теле насыпи – неравномерные просадочные деформации		
Насыпи и выемки автодорог в пределах городских территорий	Характерны просадки отдельных блоков бетона вследствие активизации суффозии и линейной (в т. ч. регрессивной) эрозии на склонах кюветов		
Трассы трубопроводов	Аварии на трубопроводах приводят к растеплению многолетнемерзлых пород, активизации линейной эрозии, термокарста и термоэрозии, подтопления и заболачивания		
Кладбища	Обустройство кладбищ сопровождается незначительной планацией рельефа, перераспределением поверхностного стока и, как следствие, снижением интенсивности заболачивания		
Участки речных долин, подвергшиеся загрязнению нефтепродуктами	Антропогенно измененные отложения, слагающие поверхности низкой и средней поймы, характеризуются низкой противоэрозионной устойчивостью, что, вкупе с деградацией растительного покрова, приводит к активизации эрозионных процессов. С другой стороны, на участках аккумуляции битумов, нередко поверхности пойм бронируются нефтепродуктами и интенсивность глубинной и боковой эрозии снижается		

Примечание. * Площадь указана с точностью до десятых км^2, объем – до сотен тыс. м^3.

Рис. 1. Антропогенная трансформация рельефа и антропогенные отложения НПР:
А – склоновые отвалы карьера «Медвежий ручей»; Б – активизация линейной эрозии на склоне отвального поля Кайерканского угольного разреза; В – насыпи под промышленную застройку в пределах «старого города»; Г – переотложенные образования (вскрышные породы глыбовой размерности, слагающие отвалы карьера «Медвежий ручей»); Д – новообразованные отложения (шлакоблоки, слагающие ж/д насыпь на участке перехода через р. Далдыкан); Е – поверхность высокой поймы на участке разлива загрязняющих веществ; Ж – наледная поляна, загрязненная нефтепродуктами, в 950 м выше устья р. Далдыкан; З – антропогенно измененные отложения (аллювий с высоким содержанием загрязняющих веществ), вскрывающиеся с поверхности в пределах наледной поляны в долине р. Далдыкан

Fig. 1. Anthropogenic transformation of terrain and anthropogenic soils of the Norilsk industrial district:
A – Slope dumps of “Medvezhij Rychei” quarry; Б – Linear erosion intensification on the slopes of subhorisontal dumps of Kayerkan coal mine; В – Embankments for industrial building in the old city of Norilsk; Г – Redeposited soils – overburden blocks of “Medvezhij Rychei” quarry; Д – Cinder blocks – components of railway embankments near the Daldykan River (class of newly formed soils); E – Floodplain surface within the spill of pollutants; Ж – Oil polluted river ice-glade 950 m upstream the mouth of the Daldykan River; З – Modified soils (alluvium with high concentration of pollutants) within the river ice-glade in the Daldykan River valley

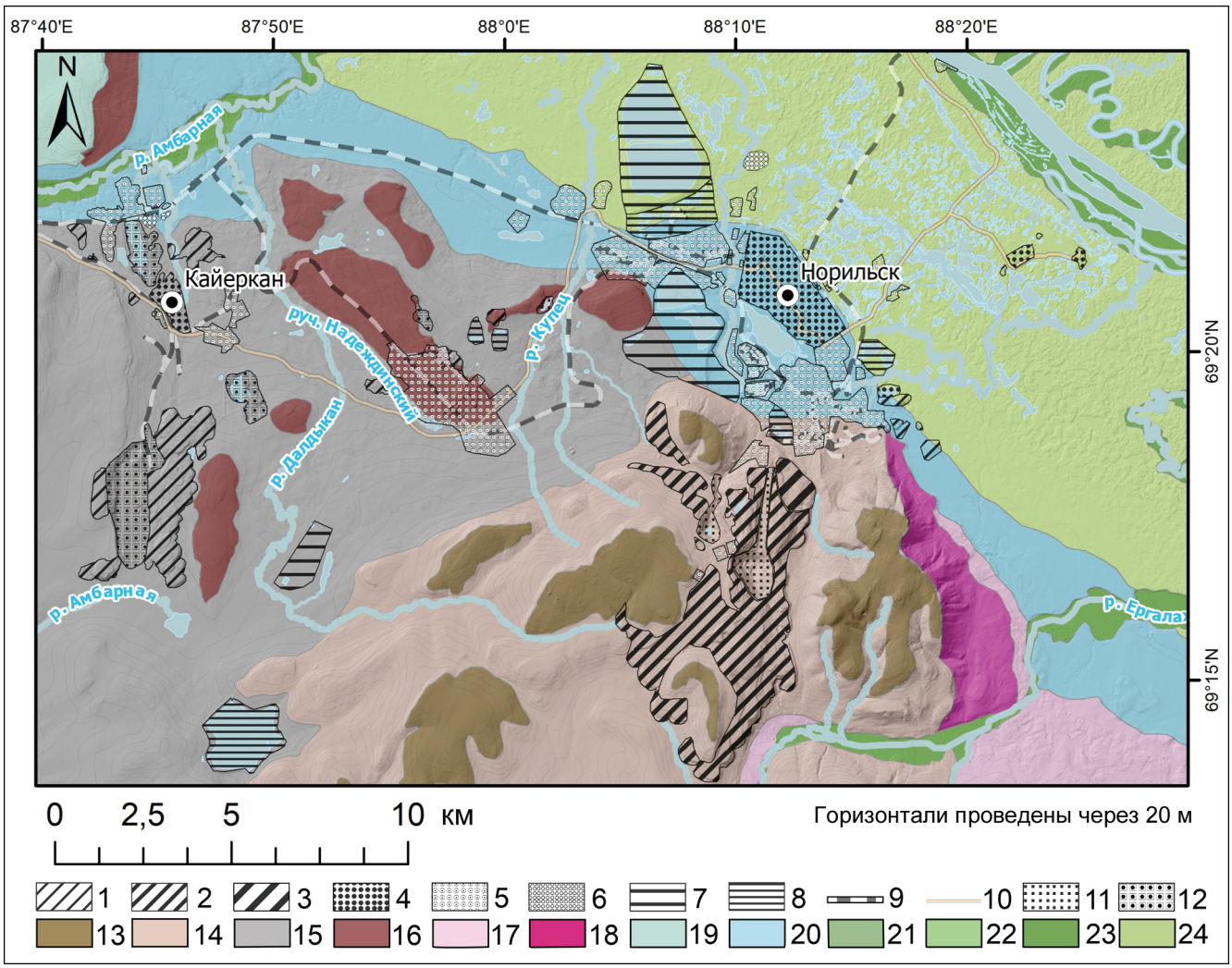

Рис. 2. Естественный и антропогенный рельеф левобережья р. Норильской (районы Норильск, Кайеркан и Оганер).
I – Антропогенный рельеф: *отвальные поля шахт и карьеров*: 1 – субгоризонтальные отвалы; 2 – склоновые отвалы; 3 – техногенный каменный глетчер; *насыпи под застройку:* 4 – селитебную; 5 – промышленную; 6 – полигоны ТБО; насыпные дамбы и площадки: 7 – хвостохранилищ; 8 – отстойников; *линейные антропогенные формы:* 9 – железнодорожные насыпи; 10 – насыпи автодорог; *карьеры по добыче медно-никелевых руд, угля, пгс и карбонатных пород:* 11 – изометричные и карьеры-прорези; 12 – карьеры с отвальными полями в днище.
II – Естественный рельеф: *структурно-денудационный рельеф:* 13 – плоские и пологонаклонные вершинные поверхности траппового плато; 14 – ступенчатые склоны плато; 15 – пластовая ступенчатая денудационная равнина со следами ледниковой аккумуляции; 16 – денудационные останцы; *ледниковый рельеф:* 17 – субгоризонтальные и наклонные поверхности неравномерной ледниковой аккумуляции (краевые и боковые морены); 18 – крутые (до отвесных) экзарационные склоны; *водно-ледниковый рельеф:* 19 – пологоволнистая флювиогляциальная равнина; 20 – волнистая поверхность Вальковской озерно-ледниковой равнины; *флювиальный и озерный рельеф:* 21 – дельта голоценового возраста; 22 – конус выноса р. Хараелах; 23 – днища речных долин (нерасчлененные I НПТ и пойма); 24 – бугристо-западинная Аяклинская озерно-аллювиальная равнина

Fig. 2. Natural and anthrogenic landforms of the left bank of the Norilskaya River (Norilsk, Kayerkan and Oganer districts).
I – Anthropogenic terrain: *Dump fields of mines and quarries*: 1 – Sub horizontal dumps; 2 – Slope dumps; 3 – Technogenic stone glacier; *Embankments for buildings*: 4 – Residential; 5 – Industrial; 6 – Landfills and waste dumps; *Bulk dams and platforms*: 7 – of tailings; 8 – of sumps (settling tanks); *Linear anthropogenic landforms*: 9 – Railway embankments; 10 – Road embankments; *Quarries for the extraction of copper-nickel ores, coal and carbonate rocks*: 11 – Isometric and linear quarries; 12 – Quarries with dump fields in the bottom. ***II – Natural terrain:*** *Structural-denudation terrain*: 13 – Flat and gently sloping interfluves of the plateau; 14 – Stepped slopes of the plateau; 15 – Stepped denudation plain with traces of glacial accumulation; 16 – Denudation remnants; *Glacial terrain*: 17 – Subhorizontal and inclined surfaces of uneven glacial accumulation (marginal and lateral moraines); 18 – Steep exaration slopes; *Water-glacial terrain*: 19 – Gently undulating fluvioglacial plain; 20 – Undulating surface of the Valkovsky lake-glacial plain; *Fluvial and lacustrine terrain*: 21 – Delta of the Holocene age; 22 – Alluvial cone of the Kharayelakh river; 23 – Undifferentiated levels of I alluvium terrace and floodplain surface; 24 – Hilly Ayaklin lake-alluvial plain

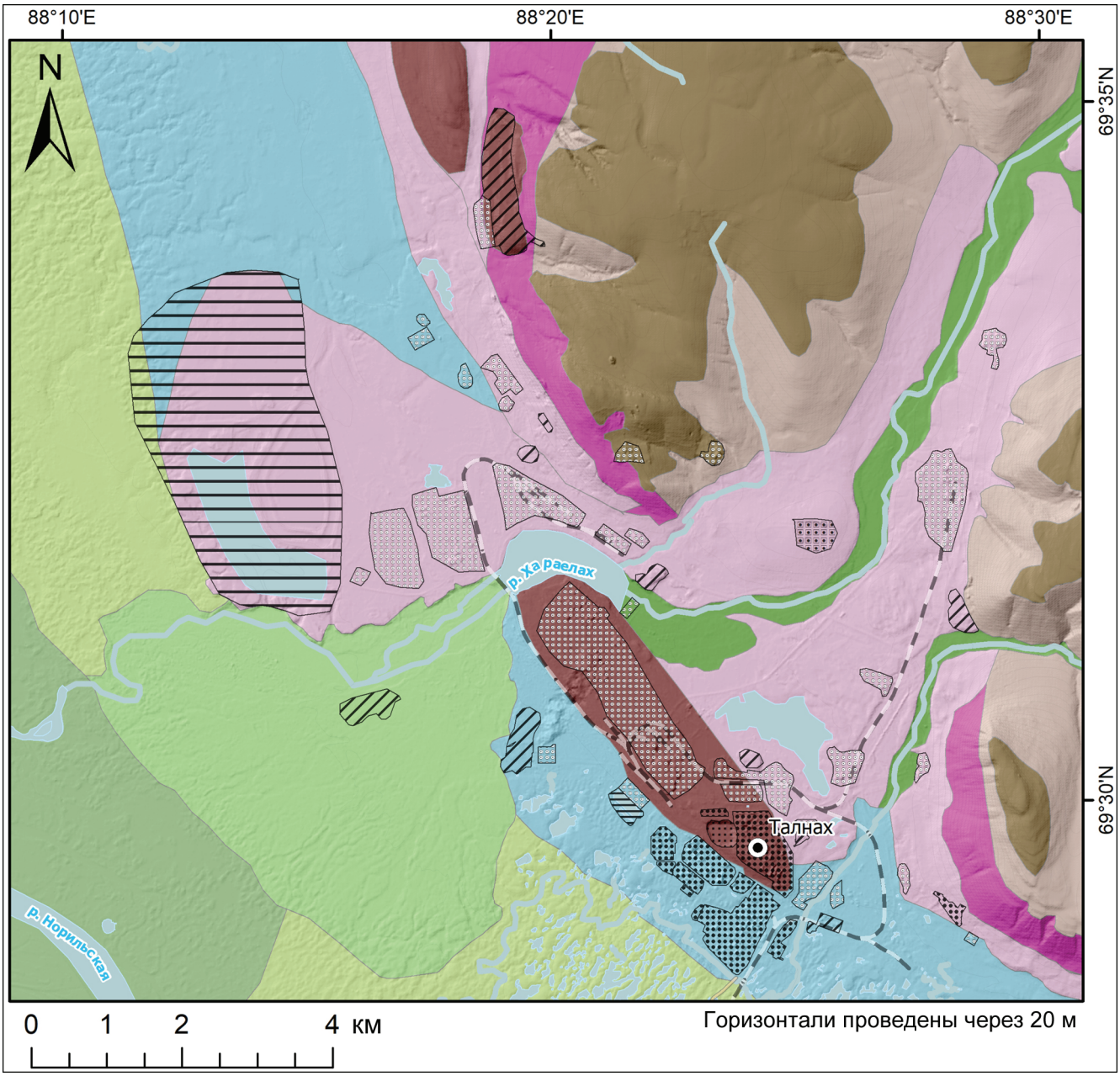

Рис. 3. Естественный и антропогенный рельеф правобережья р. Норильской (район Талнах и окрестности). Условные обозначения см. на рис. 2

Fig. 3. Natural and anthrogenic relief of the left bank of the Norilskaya River (Talnakh district and surroundings). For legend see Fig. 2

Переотложенные образования – это материал естественного происхождения, перемещенный человеком с места его первоначального залегания с сопутствующими коренными изменениями в вещественном составе и физико-механических свойствах (дробление при взрывных работах, фракционирование и др.). Данные отложения чаще всего характеризуются неоднородным гранулометрическим составом с преобладанием песчано-гравийной размерности (материал, слагающий насыпи линейных сооружений и площадок под строительство). Как правило, для склонов антропогенных форм, сложенных таким материалом, характерна активизация линейной эрозии, делювиального смыва, оползневых и осыпных процессов, а в ряде случаев – отседания.

Антропогенно измененные отложения – это породы естественного происхождения, физические и химические свойства которых были преобразованы в ходе антропогенной деятельности. Данный класс антропогенных отложений характерен для участков косвенной трансформации рельефа и включает чаще всего исключительно грунты сезонно талого слоя. В пределах НПР антропогенно преобразованные отложения встречены на участках, подвергшихся раз-

ливу жидкой фракции пульпы или нефтепродуктов. Суглинистый аллювий, содержащий значительную примесь (или полностью состоящий из техногенных частиц) имеет характерный красный, красно-бурый, бурый или темно-серый оттенок. Нефтепродукты в основном переносятся в приповерхностном слое водной толщи, однако нередко сорбируются песчано-глинистыми частицами и накапливаются на пойме и в руслах рек. Для антропогенно измененного аллювия характерно снижение плотности, водопроницаемости, прочностных свойств и сил сцепления. Меняется и гранулометрический состав за счет агрегации глинистой фракции и диспергации микроагрегатов [Шевченко, Ширшова, 2008], что отражается на интенсивности криогенных и русловых процессов.

Таблица 2

Геоморфологическая позиция участков прямой трансформации рельефа*

Типы и подтипы антропогенного рельефа	Генетический тип естественного рельефа						
	Поверхности ледниковой аккумуляции	Озерно-аллювиальная равнина	Озерно-ледниковая равнина	Денудационные останцы	Пластовая денудационная равнина	Структурно-денудационные склоны	Прочее
Крупные отвальные поля	0,37	0,22	0,90	0,94	11,90		
Склоновые отвалы						18,01	
Техногенный каменный глетчер						1,17	
Насыпи под селитебную застройку	0,09	0,73	6,60	0,57	1,01		
Насыпи под промышленную застройку	3,50	0,99	13,34	6,71	3,22	1,76	
Полигоны ТБО		0,32	0,18			0,02	0,03
Насыпные дамбы и площадки хвостохранилищ	8,20	7,93	5,26		3,22	0,11	
Насыпные дамбы и площадки отстойников		2,24	1,06		4,01	0,45	
Изометричные карьеры и карьеры-прорези				0,26		2,39	
Карьеры с отвальными полями в днище	0,44			0,16	5,14		0,05
Общая площадь, км²	*12,60*	*12,43*	*27,34*	*8,64*	*28,50*	*23,91*	*0,08*
Общая площадь, %	*11,10*	*10,96*	*24,09*	*7,61*	*25,11*	*21,06*	*0,07*
Площадь поверхности генетических типов рельефа (в границах карт), занятая антропогенными формами, %	41,44	18,95	34,87	28,39	16,92	23,97	1,57

Примечание. * Без учета линейных аккумулятивных и денудационных форм, общая площадь которых составляет около 8,9 км² (см. табл. 1).

Косвенная трансформация рельефа выражается в изменении спектра геоморфологических процессов при изменении условий рельефообразования на участках освоения. Ее следствием является образование новых форм и элементов рельефа под воздействием естественных рельефообразующих процессов, которые начинают развиваться в новых условиях. Так, антропогенное освоение в пределах НПР сопровождается практически полным *сведением растительности*, что приводит к интенсификации склоновых процессов, линейной эрозии и делювиального смыва, а на поверхности хвостохранилищ – дефляции [Бутюгин, Гулан, 2005]. В пределах зоны городской застройки и на линейных сооружениях из-за изменения *теплофизических свойств* грунтов формируются техногенные талики, происходят просадочные деформации и активизация морозобойного растрескивания, термокарста и термоэрозии, а также наледообразования [Гребенец, 2007; Гребенец, Исаков, 2016]. Угнетение древесной растительности в результате кислотных дождей [Телятников, Пристяжнюк, 2014] приводит к активизации делювиального смыва и линейной эрозии.

Косвенные трансформации рельефа в первую очередь охватывают участки прямого антропоген-

ного воздействия, однако при отсутствии последних наблюдаются и обособленные участки (см. табл. 1). Особый интерес представляют *участки речных долин* вблизи промышленных объектов (Медный завод, Талнахская обогатительная фабрика (ТОФ), Надеждинский металлургический завод), подвергшиеся загрязнению нефтепродуктов (23,6 км^2). Источниками загрязнения являются топливо (дизель и мазут), пульпа, рудничные воды и другие отходы добычи и обогащения руды, изливающиеся на поверхность при авариях. В дальнейшем материал транспортируется ручьями и реками в виде антропогенно измененных отложений. Сильно загрязненные нефтепродуктами аллювиальные отложения (мощностью до 1 м) слагают небольшие аккумулятивные флювиальные формы (побочни, осередки высотой до 20 см), залегают на поверхности высокой поймы на высоте до 4,5–5,0 м над урезом (см. рис. 1, Е).

Значительные мощности антропогенно измененного аллювия обусловлены многолетним, повсеместным и непрерывным сбросом промышленных отходов в речные долины. Установлено, что нефтепродукты в той или иной мере аккумулируются на всех участках речных долин ниже места аварии. На реках со свободным меандрированием и спокойным гидродинамическим режимом (например, в низовьях р. Амбарной) загрязненный нефтепродуктами аллювий слагает побочни и осередки, тонким слоем (до 3–4 см) покрывает обширные участки низкой и средней пойм. В долинах рек, прорезающих скальные породы, органоминеральное вещество оседает на участках резкого изменения гидродинамики потока (ниже по течению от порожистого участка русла). При этом выше сужения долины наблюдается не менее интенсивная аккумуляция, связанная с ледяными заторами и образованием наледных полян. Подобные формы (внутренние дельты, наледные поляны), в особенности – в долине р. Далдыкан, подвергшейся загрязнению при аварии на ТЭЦ-3 в мае 2020 г. (см. рис. 1, Ж, З), это наиболее распространенные геоморфологические позиции участков аккумуляции нефтепродуктов в пределах НПР.

Возраст, эволюция и динамика антропогенной трансформации рельефа. В истории хозяйственного освоения НПР можно выделить три этапа, различающихся направленностью антропогенного морфолитогенеза. *Первый этап (1920–1953)* знаменовал начало широкомасштабного освоения территории, в ходе которого антропогенная трансформация рельефа в основном охватывала структурно-денудационный рельеф Норильских гор. *Второй этап (1953–1986)* отражает переход к комплексному освоению и строительству г. Норильска, Кайеркана и Талнаха, проходку основных подземных выработок, строительство горно-обогатительных фабрик и хвостохранилищ. Именно на данном этапе освоения была создана основная часть антропогенного рельефа НПР. *Третий этап (1986–2021)* характеризуется заметным снижением скорости приращения площади антропогенных форм по сравнению с предыдущим этапом (за исключением месторождения «Норильск-2», в пределах НПР новых месторождений освоено не было), активный переход к вахтовому методу сделал нецелесообразным расширение жилищного фонда. Для этого периода характерен наибольший прирост площади ареалов косвенной трансформации рельефа, обусловленных авариями на промышленных объектах и трассах трубопроводов.

Морфология антропогенного рельефа изменяется во времени не только под действием эндогенных и экзогенных процессов, но и в зависимости от его функционального назначения и вовлеченности в природопользование. По стадии эволюции антропогенный рельеф можно разделить на: 1) *эфемерный*, морфология которого постоянно меняется (в течение дней, месяцев) на разных стадиях строительства и эксплуатации сооружений или в ходе горнодобычи (отвалы горнодобычи, карьеры в стадии эксплуатации и др.); 2) *конгруэнтный*, морфология которого остается практически неизменной (насыпные дамбы хвостохранилищ, насыпи под застройку); 3) *реликтовый* – утративший функциональное назначение при относительно мало изменившейся морфологии (например, заброшенные насыпи под строительство); 4) *трансформированный* – утративший как первоначальную морфологию (под действием экзогенных геоморфологических процессов), так и функциональное назначение (например, склоновые отвалы карьера «Медвежий ручей»).

Установлено, что наибольшее распространение в пределах НПР имеет конгруэнтный антропогенный рельеф, образованный на втором этапе освоения (1953–1986) (рис. 4). Это насыпи под селитебную и промышленную застройку Норильска, Талнаха и, в меньшей степени, Кайеркана, площадки хвостохранилищ и отстойников, а также автомобильные и железнодорожные насыпи. Эфемерные формы рельефа распространены на участках ныне действующей открытой горнодобычи (месторождения Кайеркан-ского угольного разреза и «Норильск-1»), а также в пределах строящегося гипсохранилища в верховьях р. Далдыкан и хвостохранилища ТОФ. Реликтовый тип рельефа занимает наименьшую площадь и в основном приурочен к «старому городу» Норильска, образованному на первом этапе освоения. Трансформированный тип рельефа приурочен в основном к заброшенным участкам горнодобычи.

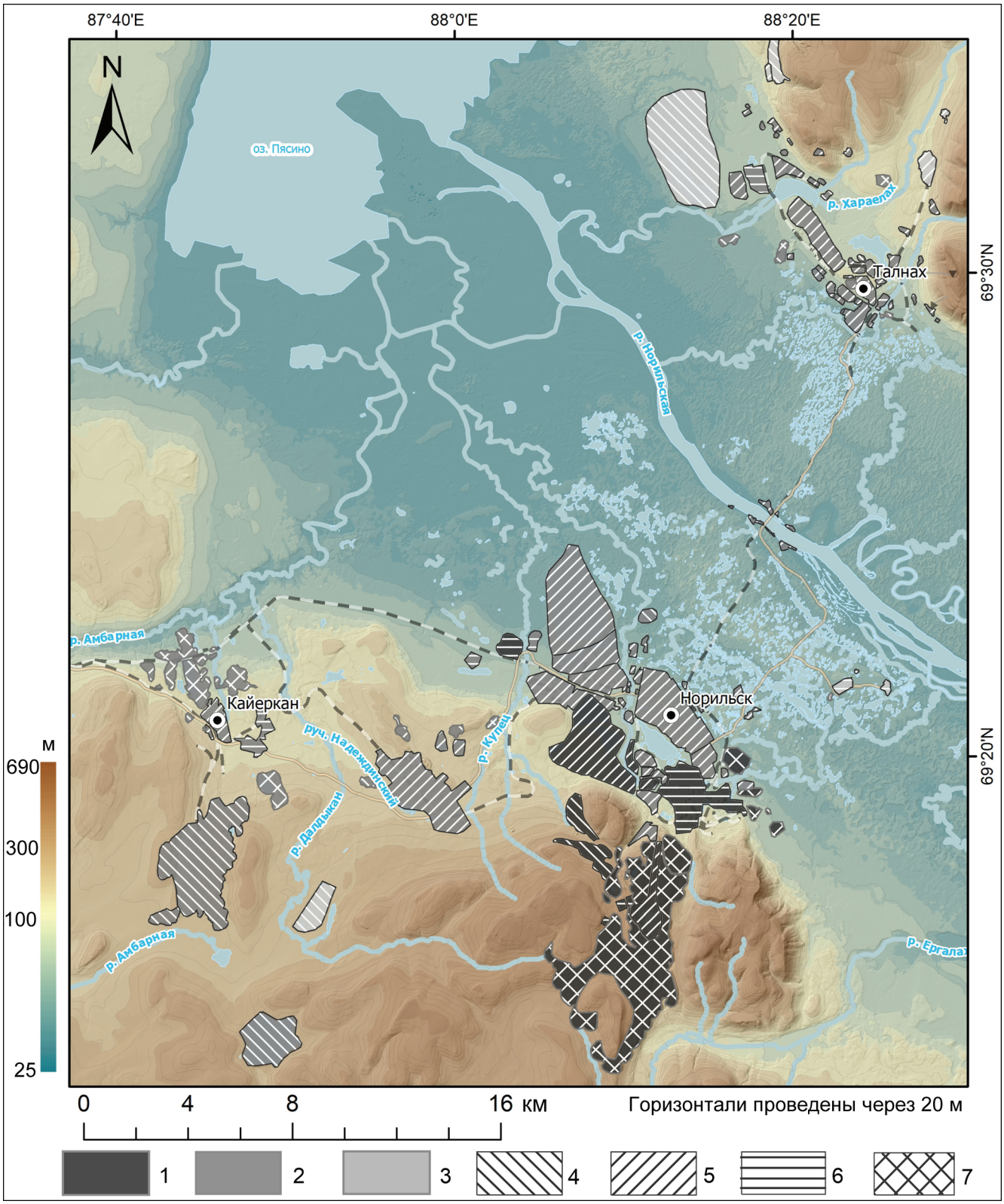

Рис. 4. Типы антропогенного рельефа, различающиеся возрастом и направленностью эволюции.
Возраст: 1 – I этап (1920–1953); 2 – II этап (1953–1986); 3 – III этап (1986–2021); *антропогенный рельеф по стадии эволюции:* 4 – эфемерный; 5 – конгруэнтный; 6 – реликтовый; 7 – трансформированный

Fig. 4. Types of anthropogenic landforms, differing in the age and the trend of evolution:
Age: 1 – I phase (1920–1953); 2 – II phase (1953–1986); 3 – III phase (1986–2021); *Anthropogenic landforms differed by stage of evolution:* 4 – ephemeral; 5 – congruent; 6 – relict; 7 – transformed

По результатам сопряженного анализа двух разновременных космических снимков (1985 и 2021) общее приращение площади антропогенного рельефа за 36 лет составило 29,2 км^2 (без учета линейных форм). Таким образом средняя скорость приращения площади достигает 0,8 км^2/год. Антропогенные формы или их комплексы ранжированы в зависимости от степени их приращения/убыли за данный период (в процентах) (рис. 5). В основном отрицательная динамика (от –16 до –2%) характерна для субгоризонтальных отвальных полей шахт и карьеров, расположенных вблизи селитебных территорий (за счет частичной рекультивации). Низкая положительная динамика (от +2 до +10%) характерна для «склонового» подтипа отвалов месторождения Норильск-1, а также для ряда насыпных площадок отстойников и отвалов вблизи карьеров по добыче известняка или угля. Более высокой положительной динамикой (от +10 до +100%) характеризуются насыпные дамбы и площадки хвостохранилищ, карьеры по добыче ПГС, угля и известняка с прилегающими к ним отвальными полями.

Также были выделены антропогенные формы, не существовавшие на начало исследуемого периода (1985). В основном это насыпи под селитебную застройку в пределах микрорайона Оганер (его строительство началось в 1986 г.), ряд отвальных полей и насыпей под промышленную застройку (к примеру, рудника «Скалистый»), а также гипсохранилище в верховьях р. Далдыкан, строительство которого началось в 2020 г. В целом наименее изменилась за последние 36 лет площадь антропогенного рельефа в пределах селитебных территорий г. Норильска (Центральный, Талнах, Кайеркан) и прилегающих к центральному району, наиболее старых, объектов инфраструктуры месторождений и обогатительных фабрик.

Возникновение обширных участков косвенных трансформаций за период с 1985 по 2021 г. прежде всего обусловлено авариями на пульпопроводах и крупных обогатительных фабриках. За 36 лет приращение площади крупных ареалов аккумуляции загрязняющих веществ составило 23,6 км^2. Наиболее крупные из них расположены в зоне слияния рек Щучья и Купец, а также в долине р. Далдыкан ниже впадения руч. Надеждинского.

Выполненная оценка масштабов антропогенной трансформации рельефа демонстрирует, что темпы антропогенного морфолитогенеза в пределах НПР на несколько порядков превышают скорости переработки вещества и энергии естественными экзогенными процессами. Морфология антропогенных форм зависит от их функционального назначения, геоморфологической позиции и геологических условий, возраста образования. На современном этапе освоения приращение площади трансформаций происходит в большей мере за счет ареалов косвенной трансформации рельефа, обусловленных техногенными авариями на промышленных объектах.

ВЫВОДЫ

Столетняя история добычи меди – никеля – платиновых руд, угля и карбонатных пород в пределах НПР вкупе с отказом от «освоения без заселения» привела к формированию одного из самых крупных ареалов антропогенного рельефа в Российской Арктике. Общая площадь участков *прямой* трансформации рельефа составила 113,5 км^2 (с учетом линейных антропогенных форм – 122,4 км^2), а *косвенной* (без учета трансформации ландшафтов за счет атмосферного загрязнения) – 23,6 км^2. Объем антропогенных форм рельефа достигает 1,8 млрд м^3. 93% площади и 72,6% объема прямых трансформаций рельефа приходятся на аккумулятивные формы.

Среди выделенных морфологических типов и подтипов антропогенного рельефа наибольшие площади занимают насыпи под промышленную застройку и хвостохранилища (29,52 км^2 и не менее 24,72 км^2 соответственно), а по объему – склоновые отвалы карьеров (порядка 480 млн м^3). Наибольшую площадь антропогенные формы рельефа занимают в пределах районов распространения структурно-денудационного и озерно-ледникового рельефа. При этом к структурно-денудационному рельефу преимущественно приурочены промышленные объекты, к озерно-ледниковому – селитебные.

Антропогенное освоение, сопровождающееся косвенными трансформациями рельефа, приводит к активизации обвально-осыпных и эрозионных процессов, а также ряда криогенных (термокарст, термоэрозия, криогенное пучение). Наиболее опасными для объектов инфраструктуры являются массовые смещения склоновых отвалов по типу оползня или каменного глетчера. Среди обособленных ареалов косвенной трансформации наибольшую площадь (около 20 км^2) занимают участки речных долин, затронутые разливами нефтепродуктов.

Наибольшее приращение площади участков прямой трансформации рельефа наблюдалось в пределах НПР с 1953 по 1986 г., бóльшая часть антропогенных форм имеет возраст от 45 до 70 лет. По характеру эволюции здесь преобладают конгруэнтные и трансформированные формы рельефа. Общее приращение площади антропогенного рельефа за последние 36 лет составило 29,2 км^2.

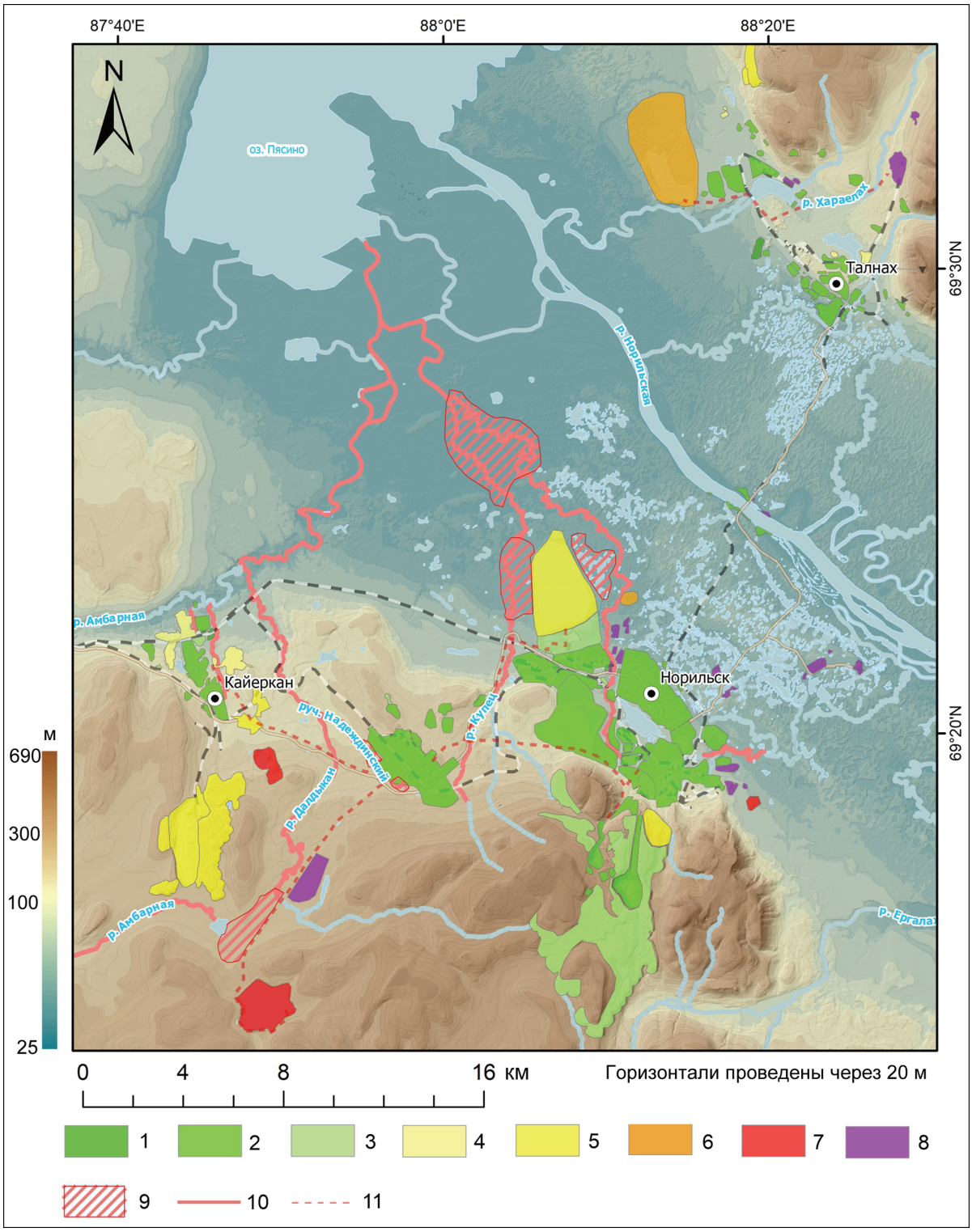

Рис. 5. Приращение площади антропогенной трансформации рельефа за 36 лет (1985–2021): *антропогенного рельефа (в % от 1985 г.):* 1 – от –16 до –2; 2 – от –2 до 2; 3 – от 2 до 10; 4 – от 10 до 30; 5 – от 30 до 70; 6 – от 70 до 100; 7 – более 100; 8 – новообразованные формы рельефа; *косвенная трансформация рельефа:* 9 – крупные ареалы загрязнения нефтепродуктами и отходами обогащения; 10 – участки речных долин, подвергшихся загрязнению; 11 – сегменты трасс трубопроводов, подвергшихся загрязнению

Fig. 5. Increment of the area of anthropogenic terrain transformation over 36 years (1985–2021): *Anthropogenic landform's area increment (as a percentage of 1985):* 1 – from –16 to –2; 2 – from –2 to 2; 3 – from 2 to 10; 4 – from 10 to 30; 5 – from 30 to 70; 6 – from 70 to 100; 7 – more than 100; 8 – newly formed landforms; *Indirect transformation of terrain:* 9 – huge areas of oil and tailings pollution; 10 – segments of river valleys polluted by oil and tailings; 11 – polluted pipeline route segments

Благодарности. Исследования выполнены Г.А. Кажукало, Е.А. Еременко и Ф.А. Романенко в рамках темы госзадания кафедры геоморфологии и палеогеографии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова «Эволюция природной среды в кайнозое, динамика рельефа, геоморфологические опасности и риски природопользования» (№ 121040100323-5). Полевые экспедиционные работы проведены Г.А. Кажукало и Ф.А. Романенко при поддержке Фонда полярных исследований «Полярный Фонд». Авторы выражают благодарность Н.Н. Луговому, Н.Г. Беловой, а также А.К. Яковенко, П.С. Джевахашвили и А.В. Котенкову за содействие при проведении экспедиционных работ в Норильске в августе 2021 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Афонин А.П., Дудлер И.В., Зиангиров Р.С., Лычко Ю.М., Огородникова Е.Н., Спиридонов Д.В., Дроздов Д.С. Классификация техногенных грунтов // Инженерная геология. 1990. № 1. С. 115–121.

Бортников Н.С., Лобанов К.В., Волков А.В. Месторождения стратегических металлов Арктической зоны // Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57. № 6. С. 479–479.

Бредихин А.В., Еременко Е.А., Харченко С.В., Беляев Ю.Р., Романенко Ф.А., Болысов С.И., Фузеина Ю.Н. Районирование Российской Арктики по типам антропогенного освоения и сопутствующей трансформации рельефа на основе кластерного анализа // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2020. № 1. С. 42–56.

Бутюгин В.В., Гулан Е.А. Геодинамическая и геоэкологическая безопасность хвостохранилищ в Норильском промышленном районе // ГИАБ. 2005. № 1. С. 122–126.

Геоморфологическое районирование территории СССР и прилегающих морей / С.С. Воскресенский, О.К. Леонтьев, А.И. Спиридонов, С.А. Лукьянова и др. М.: Высшая школа, 1980. 343 с.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Норильская. Лист R-45 – Норильск. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2016. 320 с.

Гребенец В.И. Негативные последствия деградации мерзлоты // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2007. № 3. С. 18–21.

Гребенец В.И., Исаков В.А. Деформации автомобильных и железных дорог на участке Норильск–Талнах и методы борьбы с ними // Криосфера земли. 2016. Т. 2. № 2. С. 69–77.

Гребенец В.И., Керимов А.О. Изменения характера движения крупнейшего техногенного каменного глетчера // Криосфера Земли. 1998. Т. 2. № 2. С. 38–42.

Демидюк Л.М. Распространение, мощность и температурный режим мерзлых и талых пород // Геокриология СССР. Средняя Сибирь. М.: Недра, 1989. С. 173–176.

Додин Д.А. Металлогения Таймыро-Норильского региона (север Центральной Сибири). СПб.: Наука, 2002. 822 с.

Еременко Е.А., Фузеина Ю.Н., Власов М.В., Ворошилов Е.В., Деркач А.А., Бредихин А.В. Антропогенная трансформация рельефа населенных пунктов Нижнего Приобья // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2022. № 1. С. 69–86.

Еременко Е.А., Фузеина Ю.Н., Ворошилов Е.В., Власов М.В., Бредихин А.В. Антропогенная трансформация рельефа Воркутинского промышленного района // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2021. № 1. С. 3–15.

Железный О.М., Тутубалина О.В., Кравцова В.И. Оценка изменений растительности Норильского промышленного района по дистанционным данным на основе анализа трендов спектральных индексов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 170–178.

Керимов А.Г., Гребенец В.И., Стрелецкий Д.А., Толманов В.А., Шикломанов Н.И., Юров Ф.Д., Губанов А.С. Сезонное оттаивание и осадка грунтов по результатам полевых исследований в Норильском регионе (площадка R-32 CALM) // Сб. докладов расширенного заседания Научного совета по криологии Земли РАН. Т. 1. 2018. С. 179–185.

Научно-прикладной справочник по климату СССР (Красноярский край и Тувинская АССР) / отв. ред. Н.С. Смирнова. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. Вып. 21. Ч. 1–6. 623 с.

Сарана В.А. Оледенение в западной части плато Путорана в позднем голоцене // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2017. № 1. С. 73–81.

Севастьянов Д.В., Исаченко Т.Е., Гук Е.Н. Норильский регион: от природной специфики к практике освоения // Вестник СПбГУ. 2014. Сер. 7. Вып. 3. С. 82–94.

Скачков М.С. Подземная разработка месторождений полезных ископаемых Норильского промышленного района: справочное пособие / Норильский индустр. ин-т. Норильск, 2005. 77 с.

Спиридонов Э.М. Рудно-магматические системы Норильского рудного поля // Геология и геофизика. 2010. № 9. С. 1356–1378.

Телятников М.Ю., Пристяжнюк С.А. Антропогенное влияние предприятий Норильского промышленного района на растительный покров тундры и лесотундры // Сибирский экологический журнал. 2014. № 6. С. 903–922.

Урванцев Н.Н. Норильск. М.: Недра, 1969. 155 с.

Урванцев Н.Н. Открытие Норильска. М.: Наука, 1981. 102 с.

Шевелева Н.С., Хомичевская Л.С. Геокриологические условия Енисейского Севера. М.: Наука, 1967. 128 с.

Шевченко Л.В., Ширшова И.В. Прочностные свойства мерзлых глинистых грунтов, загрязненных нефтью // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2008. № 1. С. 78–84.

Эколого-геоморфологический анализ Арктической зоны Российской Федерации / под ред. Э.А. Лихачевой, А.В. Кошкарева. М.: Медиа-ПРЕСС, 2020. 120 с.

Электронные ресурсы

Управление Федеральной службы государственной статистики по Красноярскому краю, Республике Хакасия и Республике Тыва. URL: https://krasstat.gks.ru/folder/32970 (дата обращения 05.11.2021).

Arctic DEM Explorer, URL: https://livingatlas2.arcgis.com/arcticdemexplorer/ (дата обращения 18.09.2021).

Maxar technologies, Google Earth, URL: https://earth.google.com/ (дата обращения 15.09.2021).

Поступила в редакцию 13.10.2022
После доработки 15.01.2023
Принята к публикации 22.02.2023

ANTHROPOGENIC TRANSFORMATION OF TERRAIN IN THE NORILSK INDUSTRIAL DISTRICT

G.A. Kazhukalo[1], E.A. Eremenko[2], F.A. Romanenko[3]

[1–3] *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Geomorphology and Paleogeography*

[1] *Master student; e-mail: kazhukaloga@gmail.com*
[2] *Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: eremenkoeaig@gmail.com*
[3] *Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: faromanenko@mail.ru*

The scale of anthropogenic terrain transformation within the Norilsk industrial region was quantified and a classification of its consequences has been elaborated. The work is based on the results of 2021 expeditionary geomorphologic studies, interpretation and analysis of remote sensing materials and digital elevation models. It has been established that the total area of direct terrain transformation during the territory development was about 122,4 km^2, and that of indirect transformation – 23,6 km^2. The volume of anthropogenic landforms is at least 1,8 billion m^3; accumulative forms account for 93% of the area and 72,6% of the volume of direct landform transformations. The types of anthropogenic landforms were identified, it was found that the largest area is occupied by embankments for industrial development and tailings, and the largest volume is characteristic of slope dumps. Indirect terrain transformation is mainly activation of gravitational processes, linear erosion, suffusion, thermokarst, heaving and deflation. The mass displacement of slope dumps by landslides or stone glaciers are the most dangerous for infrastructure facilities. Separate areas of indirect transformations are mainly limited to the lacustrine-alluvial lowlands and the bottoms of river valleys. Among them, the largest area (up to 20 km^2) is occupied by segments of river valleys affected by spills of oil products and tailings. It has been established that the accumulation of pollutants in river valleys of the Norilsk industrial region occurs within the internal deltas and ice glades where the longitudinal slope decreases. Three stages of anthropogenic development of the territory are distinguished (I – 1920–1953; II – 1953–1986; III – 1986–2021); the most significant increment in the area of anthropogenic terrain occurred from 1953 to 1986. The average rate of anthropogenic terrain area increment over the past 36 years amounted to 0,81 km^2/year. The highest rates of area growth are characteristic of the Kayerkan and Talnakh regions, which is associated with ongoing mining.

Keywords: Norilsk, anthropogenic landscape, Arctic development, technogenic soils, anthropogenic impact, ecological geomorphology, oil pollution

Acknowledgements. The study was carried out by G.A. Kazhukalo, E.A. Eremenko and F.A. Romanenko within the framework of the theme of the State Research Task no. 121040100323-5 of the Department of Geomorphology and Paleogeography of the MSU Faculty of Geography "Cenozoic evolution of the environment, the dynamics of the terrain, geomorphologic hazards and risks of land-use" Field works were held by F.A. Romanenko and G.A Kazhukalo within the support of the "Polyarnyj fond" polar research foundation. Authors express their gratitude to N.N. Lugovoy, N.G. Belova, A.K. Yakovenko, P.S. Dzhevakhashvilli and A.V. Kotenkov for their assistance in field works in Norilsk (August-September, 2021).

REFERENCES

Afonin A.P., Dudler I.V., Ziangirov R.S., Lychko Ju.M., Ogorodnikova E.N., Spiridonov D.V., Drozdov D.S. Klassifikacija tehnogennyh gruntov [Classification of technogenic soils], *Engineering geology world*, 1990, no. 1, p. 115–121. (In Russian)

Bortnikov N.S., Lobanov K.V., Volkov A.V. Mestorozhdenija strategicheskih metallov Arkticheskoj zony [Strategic metal deposits in the Arctic zone], *Geologija rudnyh mestorozhdenij*, 2015, vol. 57, no. 6, p. 479–479. (In Russian)

Bredikhin A.V., Eremenko E.A., Kharchenko S.V., Belyaev Ju.R., Romanenko F.A., Bolysov S.I., Fuzeina Yu.N. Rajonirovanie rossijskoj Arktiki po tipam antropogennogo osvoenija i soputstvujushhej transformacii rel'efa na osnove klasternogo analiza [Regionalization of the Russian Arctic according to the types of anthropogenic development and associated terrain transformation by applying the cluster analysis], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2020, no. 1, p. 42–56. (In Russian)

Butiugin V.V., Gulan E.A. Geodinamicheskaja i geojekologicheskaja bezopasnost' hvostohranilishh v Noril'skom promyshlennom rajone [Geodynamic and geoecological safety of tails in the Norilsk industrial district], *Mining informational and analytical bulletin*, 2005, no. 1, p. 122–126. (In Russian)

Demidjuk L.M. [Extension, depth and temperature regime of permafrost and thawed ground], *Geokriologija SSSR, Srednjaja Sibir'* [Geocryology of the USSR, Central Siberia], Moscow, Nauka Publ., 1989, p. 173–176. (In Russian)

Dodin D.A. *Metallogenija Tajmyro-Noril'skogo regiona (sever Central'noj Sibiri)* [Metallogeny of Taimyr-Norilsk region (the north of Central Siberia)], St. Petersburg, Nauka Publ., 2002, 822 p. (In Russian).

Ekologo-geomorfologicheskij analiz Arkticheskoj zony Rossijskoj Federacii [Ecologo-geomorphologic analysis of the Arctic zone of the Russian Federation], E.A. Likhacheva,

A.V. Koshkarev (eds.), Moscow, Media-PRESS Publ., 2020, 120 p. (In Russian).

Eremenko E.A., Fuzeina Yu.N., Vlasov M.V., Voroshilov E.V., Derkach A.A., Bredikhin A.V. Antropogennaja transformacija rel'efa naselennyh punktov Nizhnego Priob'ja [Anthropogenic transformation of terrain in settlements of the Lower Ob River region], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2022, no. 1, p. 69–86. (In Russian)

Eremenko E.A., Fuzeina Yu.N., Voroshilov E.V., Vlasov M.V., Bredihin A.V. Antropogennaja transformacija rel'efa Vorkutinskogo promyshlennogo rajona [Anthropogenic transformation of terrain in the Vorkuta industrial region], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2021, no. 1, p. 3–15. (In Russian)

Geomorfologicheskoe rajonirovanie territorii SSSR i prilegajushhih morej [Geomorphic Zonation of the Soviet Union and the Adjacent Seas], S.S. Voskresenskij, O.K. Leont'ev, S.A. Luk'yanova, A.I. Spiridonov i dr. (avt.), Moscow, Higher School Publ., 1980, 343 p. (In Russian).

Gosudarstvennaja geologicheskaja karta Rossijskoj Federacii m-ba 1:1 000 000 (tret'e pokolenie), Ser. Noril'skaja, list R-45 – Noril'sk, Objasnitel'naja zapiska [State geologic map of the Russian Federation 1:1 000 000, Series Norilskaya, Sheet R-45 – Noril'sk, Explanatory Note], Saint Petersburg, Kartograficheskaja fabrika VSEGEI Publ., 2016, 320 p. (In Russian)

Grebenec V.I. Negativnye posledstvija degradacii merzloty [Negative consequences of permafrost degradation], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2007, no. 3, p. 18–21. (In Russian).

Grebenec V.I., Isakov V.A. Deformacii avtomobil'nyh i zheleznyh dorog na uchastke Noril'sk–Talnah i metody bor'by s nimi [Deformations of roads and railways within the Norilsk–Talnakh section and methods of their control], *Kriosfera Zemli*, 2016, vol. 20, no. 2, p. 69–77. (In Russian).

Grebenec V.I., Kerimov A.O. Izmenenija haraktera dvizhenija krupnejshego tehnogennogo kamennogo gletchera [Changes in movement features of the largest technogenic rock glacier], *Kriosfera Zemli*, 1998, vol. 2, no. 2, p. 38–42. (In Russian)

Kerimov A.G., Grebenec V.I., Streleckij D.A., Tolmanov V.A., Shiklomanov N.I., Iurov F.D., Gubanov A.S. [Seasonal thawing and sedimentation of soils based on the results of field works in the Norilsk region (R-32 CALM platform)], *Sb. dokladov rasshirennogo zasedanija Nauchnogo Soveta po kriologii Zemli RAN* [Proceedings of the enlarged session of the Scientific Council on Earth Cryology of the Russian Academy of Sciences], 2018, vol. 1, p. 179–185. (In Russian)

Nauchno-prikladnoj spravochnik po klimatu SSSR (Krasnojarskij kraj i Tuvinskaja ASSR) [Scientific and applied reference book on the climate of the USSR (Krasnoyarsk and Tuva territories)], N.S. Smirnova (ed.), Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1990, no. 21, 623 p. (In Russian)

Sarana V.A. Oledenenie v zapadnoj chasti plato Putorana v pozdnem golocene [Glaciation of the western part of the Putorana Plateau in the Late Pleistocene and Holocene], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2017, no. 1, p. 73–81. (In Russian)

Sevast'janov D.V., Isachenko T.E., Guk E.N. Noril'skij region: ot prirodnoj specifiki k praktike osvoenija [Norilsk region: from the peculiarities of nature to the practice of development], *Vestn. SPbGU, Ser. 7,* 2014, no. 3, p. 82–94. (In Russian)

Shevchenko L.V., Shirshova I.V. Prochnostnye svojstva merzlyh glinistyh gruntov, zagrjaznennyh neft'ju [Strength parameters of frozen clay soils contaminated with oil], *Geojekologija, Inzhenernaja geologija, Gidrogeologija, Geokriologija*, 2008, no. 1, p. 78–84. (In Russian)

Sheveleva N.S., Khomichevskaya L.S. *Geokriologicheskie uslovija Enisejskogo Severa* [Geocryological conditions of the Yenisei River North], Moscow, Nauka Publ., 1967, 126 p. (In Russian)

Skachkov M.S. *Podzemnaja razrabotka mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh Noril'skogo promyshlennogo rajona: Spravochnoe posobie* [Underground mining of mineral deposits of the Norilsk industrial district: Handbook], Norilsk, Norilsk Industrial University Publ., 2005, 77 p. (In Russian)

Spiridonov E.M. Rudno – magmaticheskie sistemy Noril'skogo rudnogo polja [Ore-magmatic systems of the Noril'sk ore field], *Geologija i geofizika*, 2010, no. 9, p. 1356–1378. (In Russian)

Teljatnikov M.Yu., Pristjazhnjuk S.A. Antropogennoe vlijanie predprijatij Noril'skogo promyshlennogo rajona na rastitel'nyj pokrov tundry i lesotundry [Anthropogenic influence of enterprises of the Norilsk industrial region on the vegetation cover of tundra and forest-tundra], *Siberian Journal of Ecology*, 2014, no. 6, p. 903–922. (In Russian).

Urvancev N.N. *Noril'sk* [Norilsk], Moscow, Nedra Publ., 1969, 155 p. (In Russian)

Urvancev N.N. *Otkrytie Noril'ska* [Discovery of Norilsk], Moscow, Nauka Publ., 1981, 102 p. (In Russian)

Zheleznyi O.M, Tutubalina O.V, Kravtsova V.I. Otsenka izmenenii rastitel'nosti Noril'skogo promyshlennogo raiona po distantsionnym dannym na osnove analiza trendov spektral'nykh indeksov [Assessment of changes in vegetation of the Norilsk industrial region with remote sensing data, based on the trend analysis of spectral indices], *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, vol. 19, no. 1, p. 170–178. (In Russian)

Web sources

Arctic DEM Explorer, URL: https://livingatlas2.arcgis.com/arcticdemexplorer/ (access date 18.09.2021).

Maxar technologies, Google Earth, URL: https://earth.google.com/ (access date 15.09.2021).

Upravlenie Federal'noj sluzhby gosudarstvennoj statistiki po Krasnojarskomu kraju, Respublike Hakasija i Respublike Tyva [Department of the Federal State Statistics Service for the Krasnoyarsk Krai, the Republic of Khakassia and the Republic of Tyva], URL: https://krasstat.gks.ru/folder/32970 (access date 05.11.2021). (In Russian)

Received 13.10.2022
Revised 15.01.2023
Accepted 22.02.2023