

## ТЕХНОЛОГИЯ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.271.06.22

### ОБОСНОВАНИЕ ВИДА И ПАРАМЕТРОВ ГОРНОТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ ПРИ ОСВОЕНИИ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В УСЛОВИЯХ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА

Е. В. Громов<sup>1,2</sup>, А. Л. Билин<sup>1</sup>, О. В. Белгородцев<sup>1</sup>, Г. О. Наговицын<sup>1</sup>

*Горный институт КНЦ РАН, E-mail: evgromov@goikolasc.net.ru,  
ул. Ферсмана, 24, 184209, г. Апатиты, Россия  
Мурманский арктический государственный университет,  
ул. Лесная, 29, 7184209, г. Апатиты, Россия*

Представлен методический подход к выбору и обоснованию параметров межплощадочных транспортных систем при освоении труднодоступных арктических месторождений, базирующийся на комплексировании методов компьютерного моделирования и технико-экономической оценки. Показаны особенности проектирования транспортных систем в условиях гористой и гористо-равнинной местности. Получены зависимости затрат на транспортирование руды от объема грузопотока, позволяющие обосновать выбор транспорта. На примере месторождения Партомчорр показано, что в условиях гористо-равнинного рельефа и незначительных перепадов высот для малых значений грузопотока (до 2.4 млн т/год) наиболее эффективно применение автотранспорта, для большого грузопотока — канатно-ленточного конвейера. В условиях месторождения Чинглусуай, расположенного в гористой местности со значительным перепадом высот, обоснована эффективность использования грузовой канатно-подвесной дороги, позволяющей рекуперировать электроэнергию.

*Труднодоступные месторождения, Арктическая зона, промышленный транспорт, комбинированная разработка, карьер, подземный рудник, компьютерное моделирование, экологические ограничения, технико-экономическая оценка*

DOI: 10.15372/FTPRPI20180409

В последние годы все более явной становится проблема истощения наиболее богатых и легкодоступных для освоения месторождений полезных ископаемых. Восполнение минерально-сырьевой базы уже сейчас требует вовлечения в отработку бедных и труднодоступных месторождений, расположенных в сложных горно-геологических и климатических условиях. Ставятся вопросы о необходимости освоения перспективных георесурсов Арктического региона РФ, в недрах которого сосредоточена треть полезных ископаемых планеты, в том числе более 90 % редкоземельных и стратегических металлов страны, аккумулированных в основном в крупнейших промышленных залежах Хибинского апатита и рудах Ловозерского горного массива.

К числу таких перспективных месторождений относится месторождение комплексных апатит-нефелиновых руд Партомчорр и эвдиалит-лопаритовые руды месторождения Чинглусуай. Гористый рельеф, суровые климатические условия Арктики и близость особо охраняемых природных территорий предопределили значительное отдаление обогатительных производств от мест добычи при проектировании горных работ на этих месторождениях. Выбор межплощадочного транспорта руды при освоении месторождений является одной из важнейших задач проектирования. Горным институтом КНЦ РАН при проведении научно-исследовательских работ по освоению труднодоступных нагорных месторождений с использованием пространственного и экономико-математического моделирования разработан методический подход к технико-экономической оценке горнотранспортных схем. Аспектам применения предложенного подхода при выборе и обосновании параметров межплощадочных транспортных систем и посвящена настоящая статья.

#### **АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ОТРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПАРТОМЧОРР. КОМПЬЮТЕРНЫЕ МОДЕЛИ МАРШРУТОВ ТРАНСПОРТА РУДЫ**

Разработка месторождения Партомчорр осложняется близостью особо охраняемых природных территорий (ООПТ) [1] и наличием рек и озер непосредственно над месторождением, прорыв которых в рудник недопустим. В этих условиях разработка месторождения предполагает ряд экологических и горно-технических ограничений, связанных с оставлением рудных целиков под водные объекты, необходимостью компактного размещения объектов предприятия, повышенными экологическими платежами и др.

Одно из приоритетных решений, направленных на обеспечение промышленной и экологической безопасности ведения горных работ, — перенос обогатительных мощностей с хвостовым хозяйством за пределы их влияния на объекты ООПТ. С целью сокращения затрат, связанных со строительством фабрики, оптимальным решением является использование обогатительных мощностей ГОКа “Олений ручей”, расположенного в 30 км от предполагаемого рудника и эксплуатируемого одной горнодобывающей компанией. Это позволит избежать необходимости строительства дополнительного транспортного пути для перевозки получаемого из руд концентрата. Однако возникает необходимость строительства горнотранспортной системы от рудника Партомчорр до ГОКа “Олений ручей”, которая будет служить для транспортировки грузов, доставки людей, материалов и оборудования. Такая система будет оказывать минимальное негативное воздействие на окружающую среду и обеспечивать при этом высокие технико-экономические показатели.

С использованием горно-геологической информационной системы (ГГИС) “Mineframe” были созданы цифровые модели рельефа местности и промплощадок с размещением основных объектов поверхностной и подземной инфраструктуры, определены параметры открытых и подземных горных работ. Далее были разработаны 8 возможных вариантов транспортирования руды, условно разделенные по местоположению транспортных коммуникаций на наземные и подземные (табл. 1) [2, 3].

При этом рассмотрены как традиционные для транспортирования апатитсодержащих руд на дальние расстояния железнодорожный и автомобильный транспорт, так и новые перспективные транспортные системы — конвейеры различных конструкций (в том числе подвесные), трубопроводный транспорт, рельсовые конвейеры на дистанционном управлении.

Посредством трассирования (с учетом местоположения природоохранных территорий), построены модели оптимальных маршрутов транспортных коммуникаций (рис. 1).

ТАБЛИЦА 1. Возможные варианты транспортных систем

Используемые коммуникации	Вариант	Вид транспорта	Дальность транспортирования, км
Наземные	1	Подвесной конвейер на ходовых опорах “RopeCon”	32
	2	Канатно-ленточный конвейер	42
	5	Автомобильный транспорт	43
	6	Железнодорожный транспорт колеи 1520 мм на тепловозной тяге	43
Подземные	3	Ленточный конвейер	30
	4	Пульпопровод (шламопровод) в траншее	36
	7	Железнодорожный транспорт колеи 1520 мм на тепловозной тяге	30
	8	Рельсовый конвейер “Rail-Veyor” на дистанционном управлении	30

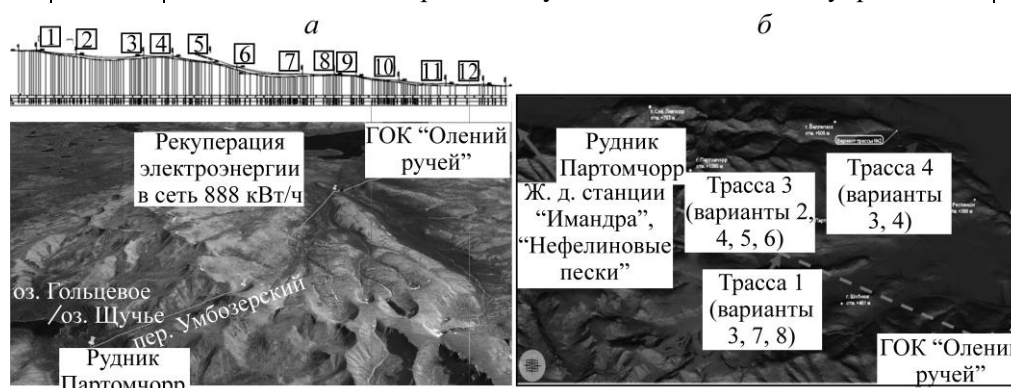


Рис. 1. Схемы моделирования маршрутов трассы для подвесного конвейера на ходовых опорах “RopeCon”: а — вариант 1; б — варианты 2–8

### ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ СРАВНЕНИЕ МЕЖПЛОЩАДОЧНОГО ТРАНСПОРТА ДЛЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПАРТОМЧОРР

Для рассмотренных вариантов межплощадочного транспорта определены инвестиции в строительство и расходы операционной деятельности на период отработки запасов руды первой очереди вскрытия месторождения — до гор. –90 м (52 года). Выбор варианта транспортирования проводился на основе моделирования затрат по годам строительства и эксплуатации (рис. 2), а также с учетом основных технико-экономических показателей (табл. 2).

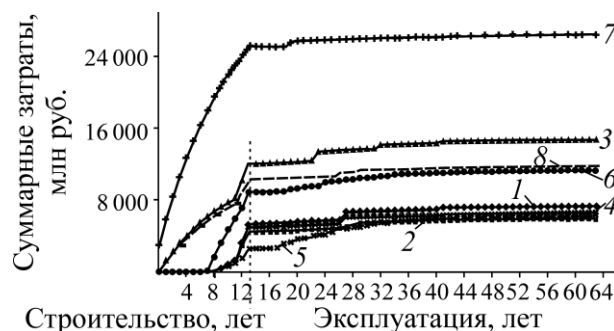


Рис. 2. Дисконтированные затраты на строительство и эксплуатацию межплощадочного транспорта нарастающим итогом. Варианты транспортирования: 1 — поверхностный подвесной конвейер “RopeCON”; 2 — поверхностный канатно-ленточный конвейер; 3 — подземный ленточный конвейер; 4 — пульпопровод в траншее; 5 — поверхностный автомобильный транспорт; 6 — поверхностный железнодорожный транспорт; 7 — подземный железнодорожный транспорт; 8 — подземный рельсовый конвейер “Rail-Veyor”

ТАБЛИЦА 2. Основные технико-экономические показатели

Параметр	Вариант							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Проектная производственная мощность по руде, млн т	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5
Всего руды за расчетный период, млн т	321.8	321.8	321.8	321.8	321.8	321.8	321.8	321.8
Горизонт расчета, лет	63	63	63	63	63	63	63	63
Дальность транспортирования, км	32.5	43.4	30.0	43.4	43.0	43.4	30.0	30.0
Срок строительства до пуска в эксплуатацию, лет	5	5	13	4.5	4.5	6	14	13
Капитальные затраты на момент пуска в эксплуатацию, млн руб.	16 383.3	13 535	26 558.3	15 213.3	7 896.1	24 225.2	44 134.9	21 840.4
Эксплуатационные расходы за расчетный период, всего, млн руб.	54 154.3	41 585.9	74 447.5	42 324.7	88 701.2	63 968.1	33 055.1	43 188.6
в том числе амортизация, млн руб.	36 729.4	28 746.5	55 763.9	28 252.4	48 986.4	28 227.1	17 360.9	32 125.8
Себестоимость транспортирования (средняя за расчетный период), руб./т	219.20	171.29	324.76	178.80	300.18	274.06	239.87	202.08
Суммарные затраты всего за расчетный период, млн руб.	70 537.6	55 120.9	104 508.3	57 538	96 597.2	88 193.3	77 190.1	65 029.0
то же с учетом дисконтирования (ставка 10 %)	7 255.3	5 862.5	14 729.8	6 490.8	6 222.2	11 294.4	26 470.8	11 731.8

Моделирование затрат на строительство и эксплуатацию транспортных схем за период отработки запасов первого этапа вскрытия показало, что по критерию минимума дисконтированных затрат наиболее предпочтительно транспортирование руды канатно-ленточными конвейерами (КЛК). Ранее выполненные исследования и опыт эксплуатации КЛК на многих зарубежных и ряде отечественных рудников подтверждают, что они являются одними из наиболее эффективных транспортных систем для перемещения руды с производительностью более 400 т/ч на расстояние от 4 до 50 км, в том числе в сложных горно-климатических условиях Севера. В качестве одного из примеров служит канатно-ленточный конвейер компании “Line Greek” (Канада), расположенный на территории государственного природного заказника “Elk walley” и имеющий протяженность более 10 км [4, 5].

Далее для наиболее технически осуществимых транспортных систем с учетом неопределенности времени ввода месторождения Партомчорр в эксплуатацию выполнена оценка изменения затрат на транспортирование от годовой производительности рудника (в пределах от 1 до 7.5 млн т/год) (рис. 3).

Анализ выявленных зависимостей показывает, что для малых значений грузопотока (до 2.4 млн т/год — для условий месторождения Партомчорр) наиболее эффективно применение автотранспорта, для больших — КЛК. В [2] установлено, что переход на конвейерный способ транспортирования позволит предотвратить экологический ущерб за период отработки запасов первой очереди в размере до 907 млн руб. (при  $A_2 = 7.5$  млн т/год).

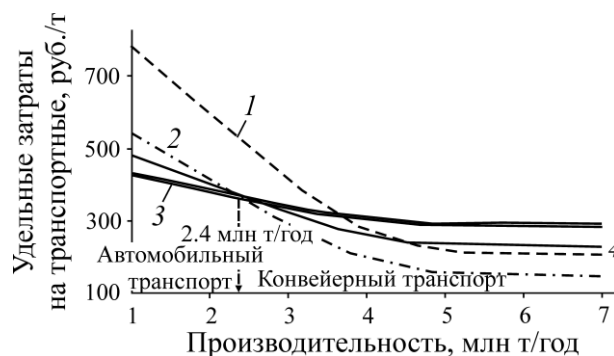


Рис. 3. Зависимость стоимости транспортирования от годовой производительности; варианты: 1 — подвесной ленточный конвейер типа "RopeCon"; 2 — канатно-ленточный конвейер; 3 — автосамосвалы; 4 — железная дорога

### АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ОТРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЧИНГЛУСУАЙ. КОМПЬЮТЕРНЫЕ МОДЕЛИ МАРШРУТОВ ТРАНСПОРТА РУДЫ

Научно-исследовательские работы, выполненные с использованием объемного моделирования в ГГИС "Mineframe" [6], позволили обосновать параметры комбинированной разработки месторождения Чингласуай с последовательной отработкой верхней части запасов открытыми и нижней — подземными горными работами. Одной из ключевых особенностей горно-геологических условий разработки данного участка является его нагорное расположение на отметках 1000–1100 м, в то время как обогатительный комплекс находится на 600 м ниже. В качестве благоприятного фактора разработки месторождения выступает его пластовое распространение в приповерхностной зоне массива при почти полном отсутствии вскрышных пород, встречающихся в виде локальных пропластков более бедных разновидностей руд эвдиалитового комплекса. Нагорное размещение предполагает необходимость транспортирования добываемой руды сверху вниз, что представляет довольно сложную техническую задачу. Кроме того, с учетом оценки нестабильного спроса на минеральное сырье и перспективой подземного способа разработки производственная мощность рудника может колебаться в значительных пределах (от 0.6 до 4 млн т/год).

Для обоснования межплощадочной транспортной системы разработаны маршруты трасс с использованием наземных и подземных коммуникаций (табл. 3). В качестве карьерного транспорта во всех вариантах предусматривается применение автосамосвалов.

ТАБЛИЦА 3. Возможные варианты транспортных систем

Используемые коммуникации	Вариант	Вид транспорта	Дальность транспортирования, км
Наземные	1	Автомобильный с использованием карьерных автосамосвалов	12.00
	2	Грузовая канатно-подвесная дорога	6.78
Подземные	3	Ленточный конвейер	6.35
	4	Железнодорожный узкой колеи на электрической тяге	6.35

На карьерах с относительно небольшой производительностью самый распространенный вид транспорта автомобильный (вариант 1). Этот вариант транспортирования позволяет вывозить руду с карьера и доставлять ее до фабрики без перегрузок. В качестве альтернативного

принят вариант с применением грузовой канатной дороги (ГКД) (вариант 2), которая дает возможность в горных, пересеченных, труднодоступных местностях обеспечивать перевозки по кратчайшему расстоянию с относительно небольшими затратами [7, 8]. Тяговые расчеты показали, что ГКД будет функционировать в режиме частичной рекуперации электроэнергии, поскольку груз транспортируется вниз (рис. 4) и подпитка электроэнергии необходима только на запуск транспортной установки [9].

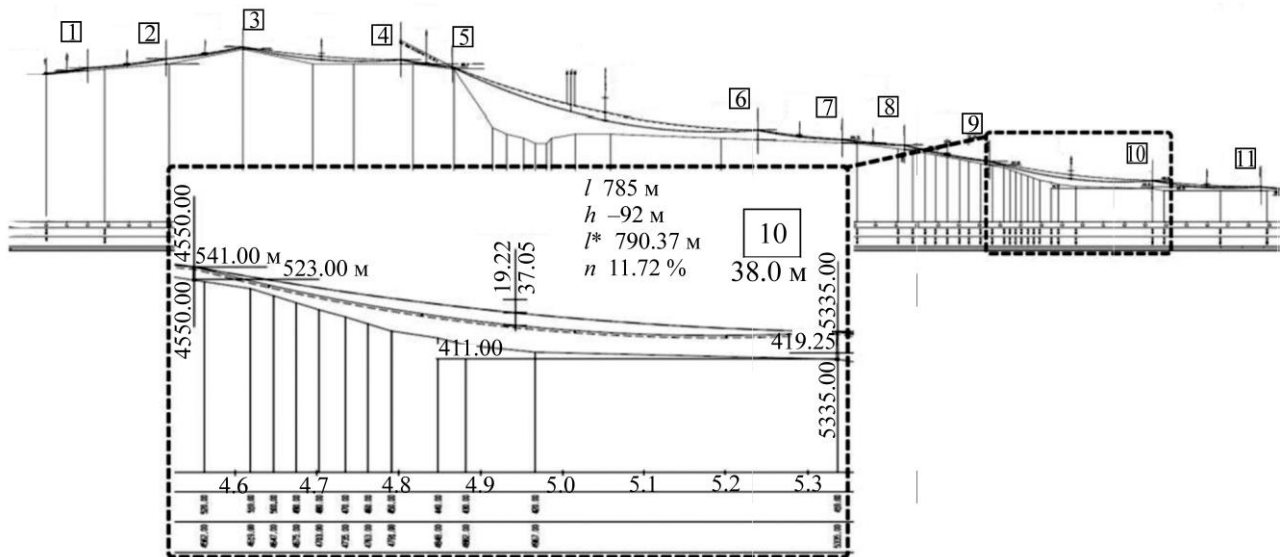


Рис. 4. Профиль трассы грузовой канатной дороги при производительности 230 т/ч (1.2 млн т/год):  $l, l^*$  — длина порожнякового и грузового каната на участке, м;  $n$  — уклон, %

С перспективой возможности наращивания производственной мощности при освоении запасов массива и перехода на подземный способ разработки рассмотрены следующие варианты транспортирования руды по подземным горным выработкам: карьерные рудоспуски в сочетании с железнодорожными (вариант 3) или конвейерными (вариант 4) штольнями.

Для варианта 3 подземный железнодорожный комплекс будет использовать контактные шахтные электровозы К-14 с вагонетками типа ВДР-5.3 емкостью  $5.3 \text{ м}^3$  и станцию донной разгрузки в районе обогатительной фабрики. Транспортная штольня оборудуется двухпутевой железнодорожной веткой с колеей шириной 750 мм, погрузочная ветвь — однопутевой (рис. 5). Длина транспортной штольни составляет 5000 м, с уклоном 3 %. Подземный транспортный горизонт располагается на абсолютной отметке +465 м. Длины карьерных рудоспусков 1, 2 равны соответственно 610 и 560 м. Чистый воздух с поверхности на транспортный горизонт нагнетается вентилятором главного проветривания по транспортной штольне и далее, омывая комплекс выработок на горизонте +465 м, выдается по вентиляционной выработке в вентиляционно-ходовой восстающий (ВХВ) 1, пройденный до поверхности.

В подземном конвейерном комплексе используются два конвейера (погрузочный и магистральный) с шириной ленты 1 м. Протяженность погрузочной ветви от рудоспусков до транспортной штольни составляет 1350 м, где руда перегружается на конвейер длиной 5000 м и транспортируется на обогатительную фабрику. Абсолютная отметка подземного транспортного комплекса +600 м. Уклон транспортной штольни 30%. Длина рудоспусков 1 и 2 — 475 и 425 м. Схема проветривания аналогична первому варианту.



Рис. 5. Схема вскрытия с использованием железнодорожного транспорта: 2-С2 — 2-е рудное тело, категория разновидности С2; 1-С2 — 1-е рудное тело, категория разновидности С2 и т. д.

#### ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ СРАВНЕНИЕ МЕЖПЛОЩАДОЧНОГО ТРАНСПОРТА ДЛЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЧИНГЛУСАЙ

С целью обоснования наиболее эффективной транспортной системы с учетом возможной изменчивости объема грузопотока выполнены технико-экономические расчеты затрат на транспортирование для значений грузопотока от 0.6 до 4 млн т/год.

Анализируя результаты технико-экономического сравнения (табл. 4–6; рис. 6), можно заключить, что на всех этапах роста производительности удельные затраты на транспортирование ниже для грузовой канатной дороги. Наихудшим является вариант с применением автотранспорта, что связано с большими перепадами высот и значительной длиной трассы. Дисконтированные затраты на строительство и эксплуатацию транспортных комплексов показывают, что при производительности от 3 млн т/год предпочтительнее становится схема транспортирования с подъемным конвейерным комплексом. Однако, поскольку длительность проходки подземных транспортных выработок больше, чем строительство наземных коммуникаций (ориентировочно в 2.5–3.0 раза), с учетом прибыли от реализации продукции вариант с канатной дороги в рассматриваемом периоде все же более рациональный.

ТАБЛИЦА 4. Экономические показатели автомобильного транспорта

Расчетный показатель	Производительность автотранспорта		
	600	1200	4000
Объем перевозки рудной массы, тыс. т/год	600	1200	4000
Инвентарный парк автомобильного транспорта, ед.	30	30	48
Капитальные вложения, млн руб.:	1296	1316	1584
автосамосвалы	396	396	634
автомобильная дорога (расширение)	800	800	800
гаражно-ремонтное хозяйство	100	120	150
Годовые эксплуатационные расходы (без амортизации), млн руб.:	96.44	183.03	556.36
оплата труда и социальные отчисления	50.51	91.18	275.93
запчасти	13.80	27.60	66.24
шины	3.04	6.08	2026
топливо	29.09	58.18	193.93
Себестоимость вывозки 1 т руды (без учета амортизации), руб./т	160.74	152.53	139.09
Дисконтированные затраты за 30 лет (норма дисконтирования 10 %), млрд руб.	1.8	2.7	5.8

ТАБЛИЦА 5. Экономические показатели грузовой канатной дороги (ГКД) с учетом сборочного карьерного автотранспорта

Расчетный показатель	Производительность ГКД		
	600	1200	4000
Годовой объем рудной массы, тыс. т	600	1200	4000
Количество установок	1	1	2
Капитальные вложения, млн руб.:	920	1 097	2 476
оборудование	578	702	1636
доставка, СМР, шеф-монтаж	249	302	746
карьерные автосамосвалы и ремонтное хозяйство	92	92	136
Годовые эксплуатационные расходы (без амортизации), млн руб.:	43.90	45.49	49.30
оплата труда и социальные отчисления	27.24	27.24	35.7
электроэнергия	-1.52	-3.83	-13.78
материалы, запчасти и ремонт	18.18	22.09	27.31
карьерные перевозки автотранспортом	16.76	30.83	75.75
Себестоимость транспортирования 1 т руды, руб./т (без учета амортизации)	73.16	37.91	24.65
Дисконтированные затраты за 30 лет (норма дисконтирования 10 %)	1.3	1.6	3.0

ТАБЛИЦА 6. Экономические показатели подземного железнодорожного / конвейерного комплекса и сборочного автотранспорта

Показатель	Производительность ПЖК			Производительность ПКК		
	600	1200	4000	600	1200	4000
Годовой объем рудничной массы, тыс. т	600	1200	4000	600	1200	4000
Капитальные вложения, млн руб.:	2323.93	2440.56	2743.01	2822.42	2822.42	2822.42
горнопроходческие работы	2183.80	2183.80	2183.80	2327.10	2327.10	2327.10
приобретение и монтаж оборудования	140.13	256.76	559.21	495.32	495.32	495.32
Годовые эксплуатационные расходы (без амортизации), млн руб.:	60.8	84.3	182.6	77.4	92.0	140.4
оплата труда и социальные отчисления	26.4	31.4	56.1	38.7	39.6	44
электроэнергия	18.7	24.7	62.6	22.2	23.1	30.9
вспомогательные материалы	1.1	1.6	2.2	1.9	2.7	3.8
карьерные перевозки автотранспортом	14.6	26.6	61.7	14.6	26.6	61.7
Себестоимость транспортирования 1 т руды, руб./т (без учета амортизации)	101.33	70.25	45.65	129.00	76.67	35.10
Дисконтированные затраты за 30 лет (норма дисконтирования 10 %)	1.7	2.0	2.9	2.2	2.4	2.6

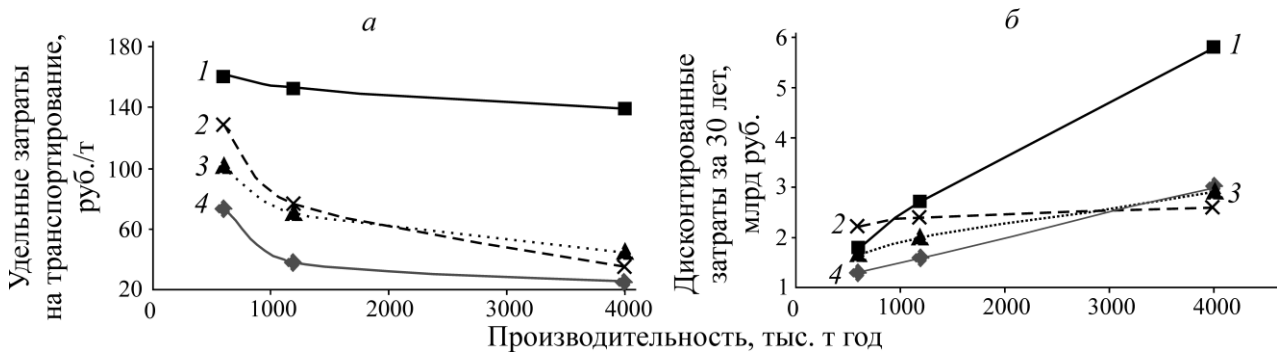


Рис. 6. Зависимость стоимости транспортирования (а) и дисконтированных затрат на транспортирование (б) от годовой производительности: 1 — автосамосвалы; 2 — ПКК; 3 — ПЖК; 4 — ГКД



## ВЫВОДЫ

Комплексный метод исследований на основе интеграции компьютерного и экономико-математического моделирования транспортных систем в сложных климатических и топографических условиях позволил произвести выбор рациональных видов транспорта для месторождений Партомчорр и Чингласуай. Приведены особенности проектирования транспортных систем в условиях гористой и гористо-равнинной местности. По результатам повариантных технико-экономических расчетов получены зависимости затрат на транспортирование руды от объема грузопотока, позволяющие обосновать выбор вида транспорта. С учетом полученных закономерностей на примере месторождения Партомчорр показано, что в условиях гористо-равнинного рельефа и незначительных перепадов высот для меньших значений грузопотока (до 2.4 млн т/год) наиболее эффективно применение автотранспорта, а для больших — канатно-ленточного конвейера. Для месторождения Чингласуай, расположенного в гористой местности со значительным перепадом высот, обоснована эффективность использования грузовой канатно-подвесной дороги, позволяющей рекуперировать электроэнергию.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Постановление** Правительства РФ от 08.02.2018 г. № 130 О создании национального парка “Хибины”. СЗ РФ. — 2018. — № 9. — С. 1385.
2. **Громов Е. В.** Повышение эффективности разработки месторождений бедных руд в условиях экологических ограничений (на примере апатит-нефелинового месторождения “Партомчорр”): автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Апатиты, 2016. — 148 с.
3. **Лукичев С. В., Громов Е. В., Шибеева Д. Н., Терещенко С. В.** Оценка эффективности экологически сбалансированной технологии разработки месторождения стратегического сырья Партомчорр в Арктической зоне России // Горн. журн. — 2017. — № 12. — С. 57–62.
4. **Гребенешников А. Л., Паламарчук Н. В.** Канатно-ленточные конвейеры // Горн. пром-сть. — 2006. — № 4. — С. 15–16.
5. **Lewis Andrew, Гребенешников А. Л.** Канатно-ленточные конвейеры большой протяженности // Горн. пром-сть. — 2005. — № 3. — С. 42–47.
6. **Наговицын О. В., Лукичев С. В.** Автоматизированные инструменты инженерного обеспечения горных работ в системе Mineframe // ГИАБ. — 2013. — № 7. — С. 184–192.
7. **Земсков А. Н., Полетаев И. Г.** Грузовые подвесные канатные дороги – перспективное средство транспортирования полезных ископаемых // Проектирование, производство и эксплуатация машин и механизмов для горнодобывающей промышленности: сб. трудов. — Пермь: ПКИ Горнефтемаш, 2003. — С. 24–30.
8. **Кулешов А. А., Васильев К. А., Докукин В. П., Коптев В. Ю.** Анализ вариантов транспортирования руды от карьера до обогатительной фабрики в условиях АК “АЛРОСА” // Горн. журн. — 2003. — № 6. — С. 13–16.
9. **Билин А. Л., Громов Е. В., Торопов Д. А.** Сопоставление транспортных схем при освоении месторождения в нагорных условиях // ГИАБ. — 2017. — № 10 (спец. вып. 23). — С. 117–125.

*Поступила в редакцию 31/V 2018*