

*С.С.Головенко, В.Я.Григорьев, И.В.Крыленко,*

*Б.В.Матвеев, А.Ю.Сидорчук*

## ЭРОЗИОННО-АККУМУЛЯТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ НА ПОЛУОСТРОВЕ ЯМАЛ И ИХ ОЦЕНКА В СВЯЗИ С ПРОМЫШЛЕННЫМ ОСВОЕНИЕМ РЕГИОНА (НА ПРИМЕРЕ БОВАНЕНКОВСКОГО ГКМ)

Территория полуострова Ямал даже в естественном состоянии подвергается интенсивной эрозии, развитию солифлюксии, криопланации и русловых процессов. Можно выделить три основных причины первичного расчленения территории: 1) эрозионно-аккумулятивная деятельность рек Се-Яхи, Морда-Яхти, Юнета-Яхти и их притоков. В результате формирования их долин возник основной перепад высот с амплитудой до 40 м и длиной склонов 1.5-2 км; 2) процессы криопланации - вытаявание пластовых льдов и образование террасовидных поверхностей на различных отметках, обычно привязанных к пойме реки, уровню воды в реке или крупном озере; такое вторичное расчленение приводит к перепаду высот до 30 м и формированию склонов до 0.5 км; 3) процессы спуска термокарстовых озер и понижения местных базисов эрозии. Большое значение для развития ручейковой и овражной эрозии имеют посткриогенные сплывы - быстрая солифлюксия. Активизация этого процесса происходит раз в 10-40 лет. В основе его лежит движение грунта вязко-текущей консистенции. Развивающиеся в настоящее время линейно вытянутые вдоль склона посткриогенные сплывы протягиваются от приводораздельных участков междуречий и транспортируют материал вплоть до местного базиса эрозии. Длина их до 400-700 м, ширина - до 200-300 м. Скорость движения материала на таких участках достигает 50-100 м в год. Их свидетельством является полосчатое чередование нагромождений отдельных блоков грунта у основания склона.

Оползни, посткриогенные сплывы начинаются подчас на совершенно плоской поверхности, подстилаемой ледяным массивом. Объем материала, смещающегося вниз по склону в результате этого процесса - до 50-100 тыс. куб.м.

В результате без всякого вмешательства человека на склонах образуются протяженные полосы оголенного легкоразмываемого грунта, в пределах которых может впоследствии развиваться овражная эрозия. Последняя, в свою очередь, способствует дальнейшему развитию криопланации, солифлюксии и др.

Техногенные нагрузки, связанные с освоением газово-конденсатных месторождений (ГКМ), привели к активизации эрозионных и термоэрозионных процессов. Происходит увеличение площади тундры, лишенной почвенно-растительного покрова, защищающего ее от эрозии. В результате широкое распространение получает ручейковая и овражная эрозия, которая в ближайшее время может привести к катастрофическим последствиям (изменению почвенного покрова и всей природ-

ной среды, авариям и повреждению инженерных объектов). Ручейковая (склоновая), овражная (линейная) и русловая (речная) эрозия тесно взаимосвязаны между собой и составляют единый эрозионно-аккумулятивный процесс. Однако в зависимости от интенсивности их проявления в разные периоды времени они могут находиться в разных взаимоотношениях и представлять разную степень опасности.

### Овражная эрозия

В районе Бованенковского ГКМ в настоящее время особенно большую опасность для инженерных сооружений и построек представляет овражная (линейная) эрозия. По отношению к реализации потенциала овражной эрозии территория ГКМ разделяется на: 1) возвышенные участки с крутыми солифлюкционно-делювиальными и солифлюкционно-оплывными склонами; 2) низменные участки с выровненным рельефом (озерная и речная поймы, днища хасыреев). Подавляющее количество оврагов, максимальная густота их сети на единицу площади и длины подножья склона приходится на возвышенные территории (табл.1).

Таблица 1

#### Характеристика овражной сети на территории Бованенковского ГКМ

Тип местности	Густота овражно-балочной сети, км/кв.км	Количество овражных вершин, ед/кв.км	Количество оврагов на единицу длины подножья склона, ед/км	Средняя длина оврагов, м
Возвышенные территории	1.28	4.7	2.1	272
Низменные территории	0.095	0.4	-	235

На момент начала освоения овраги и балки, образовавшиеся как на возвышенных, так и на низменных территориях, развивались как естественные формы и полностью контролировались природными факторами. В связи с освоением территории появились овраги антропогенного происхождения. Интенсивность их развития катастрофически высока. Они быстро продвигаются к инженерным сооружениям ГКМ, создавая им реальную угрозу. Назрела острая необходимость в оперативной разработке и осуществлении защитных мероприятий. Решение этой задачи обычно проводится на основе оценки и прогноза интенсивности процесса эрозии.

Натурные наблюдения за процессами эрозии на территории Бованенковского ГКМ проведены в августе 1990 г. (период осенних дождей)

и в июне 1991 г. (период снеготаяния) на нарушенных антропогенной деятельностью склонах и в эрозионных формах в районе пос. КЭХ. В качестве объектов исследования эрозионных процессов во время осенних дождей и при снеготаянии выбраны 3 водосбора с антропогенными оврагами и развитой ручейковой сетью. Эти овраги сформировались из естественных коротких береговых оврагов длиной не более 50 м, широко развитых на крутом подмываемом уступе высокого берега р. Се-Яха, представленного III морской террасой. В результате полного уничтожения растительного покрова на территории поселка и на относительно пологих склонах активно начала проявляться ручейковая и овражная эрозия.

Овраг № 1 имеет длину 315 м, площадь водосбора 36000 м<sup>2</sup>. Собственно овражная форма занимает нижние 196 м вреза. Овраг осваивает выпуклый склон, верхние 200 м которого имеют крутизну 51‰ (3°.03'), средние 60 м - 75‰ (4°.3) и нижние 60 м - 220‰ (12°.5). Именно в нижней области склона возник первичный естественный овраг.

На данный момент овраг № 1 имеет невыработанный вогнуто-выпуклый продольный профиль, ступенчатый и Y-образный поперечный профиль с бортами крутизной до 520‰ (27°). Максимальный врез в средней части - 4.4-5.5 м. Верховой уступ состоял из серии ступеней. Выше верхнего уступа сформировалась система эрозионных ложбин глубиной 0.5-0.7 м, протягивающаяся практически до водораздела. Площадь склона выше вершины оврага - 10100 кв.м, средняя его крутизна - 62‰ (3°.5). Склон, борта и днище оврага сложены тяжелыми суглинками и глинами с массивной криогенной текстурой. Протаивание в августе 1990 г. составило 1.0-1.3 м.

Овраг № 2 имеет длину 390 м, площадь водосбора 50600 кв.м, овражная форма занимает нижние 200 м. Овраг осваивает практически прямой склон крутизной 43‰ (2°.5), который крутым уступом (длина 50 м, крутизна 260‰ (14°.6)) обрывается к руслу Се-Яхи. Продольный профиль оврага выпуклый, ступенчатый. Максимальный врез в зоне перегиба склона - 6 м. Верховой уступ плохо выражен, представляет собой серию ступеней, и овраг постепенно переходит в ложбину, поперечный профиль Y-образный, крутизна склона до 650‰ (33°). Выше верхового уступа сформировалась система эрозионных ложбин на склоне длиной 190 м и площадью 28300 кв.м, средней крутизной 50‰ (2°.9). Прорезаемая оврагом толща - тяжелые суглинки и глины с массивной криогенной текстурой, оттаивает на 1.1-1.3 м.

Овраг № 3 имеет длину 675 м, площадь водосбора 131000 кв.м, овражная форма занимает нижние 375 м. Первоначальный склон прямой, крутизной 26.9‰ (1°.5), обрывающийся к Се-Яхе уступом длиной 10 м и крутизной 700‰ (36°). Продольный профиль оврага также практически прямой, с несколькими ступенями в верхней его части при переходе в ложбину. Максимальный врез в низовьях, в области расположения первоначального берегового оврага - 6 м. Поперечный профиль трапециевидный, крутизна бортов до 39° (800‰). У оврага две активные вер-

шины, выше которых на длинном (680 м) пологом склоне сформировалась система эрозионных ложбин.

Вдоль каждой эрозионной формы было разбито 6-7 поперечных створов, в которых при прохождении паводка фиксировались: ширина потока  $b$ , максимальная глубина потока  $H_m$ , средняя глубина потока  $h$ , максимальная скорость потока  $V_m$ , средняя скорость потока  $V$ , расход воды в потоке  $Q$ , мутность потока  $S$ , уклон дна русла  $J$ . Ширина потока  $b$  измерялась линейкой между двумя урезами на участке русла длиной 3-5 м с 6-10 кратной повторностью, а затем вычислялась средняя величина. Максимальная глубина  $H_m$  потока измерялась линейкой с 6-10-кратной повторностью на участке русла длиной 3-5 м, а затем вычислялась средняя величина. Средняя глубина потока  $h$  вычислялась осреднением глубин в отдельных поперечных створах. Максимальная скорость потока  $V_m$  измерялась поплавками на участке русла длиной 3-5 м. Средняя скорость  $V$  измерялась с помощью фиксации перемещения пятна красителя или раствора соли. Расход воды  $Q$  определялся объемным способом с помощью тарированной емкости или вычислялся по формуле  $Q = Vhb$ . Мутность воды  $S$  определялась в пробах воды объемом 0.2-1.5 л стандартным методом. Уклон дна нивелировался. Скорость роста оврагов определялась измерениями мерной лентой расстояний от их вершины до закрепленных реперов, а также повторными нивелировками по тальвегам оврагов. Физические свойства почвогрунтов, обуславливающие их противозэрозионную стойкость, определялись в образцах нарушенного и ненарушенного сложения.

В период 5 - 10 августа 1990 г. на Ямале выпадали обложные дожди малой интенсивности. Сравнение результатов наблюдений на Бованенковском ГКМ (табл.2) с данными суточного максимума осадков (мм) различной обеспеченности по метеостанции Марре-Сале показывает, что дождь, прошедший в 8-10 часов 8 августа по сумме осадков имеет обеспеченность 5-3% и близок к наблюдававшемуся максимуму, равному 39 мм.

Таблица 2

**Слой и средняя на 30 мин интенсивность осадков 7-8 августа 1990 г. в районе пос. КЭХ Бованенковского ГКМ**

Дата	7 августа				8 августа				
	10.05	10.20	10.35	10.50	8.05	8.35	9.05	9.35	10.05
Время, час									
Суммарный слой осадков, мм	1.4	2.1	2.8	3.2	3.2	10.6	23.7	28.3	31.8
Интенсивность за 30 мин, мм/мин	0.093	0.037			0.25	0.44	0.15	0.12	

Высокая водонасыщенность грунтов на водосборе привела к быстрому формированию поверхностного стока, так что все дожди, даже самые небольшие оказались стокообразующим.

Результаты измерений гидравлично-морфометрических характеристик дождевого стока в эрозионных формах позволили установить ряд закономерностей изменения параметров потоков дождевых вод:

1. Ширина потока  $b$  в оврагах зависит от расхода воды  $Q$  и уклона русла:

$$b = 0.4Q^{0.25} / \sqrt{I}$$

На фоне этой общей тенденции происходит стохастическое изменение ширины русла вдоль потока, связанное с неравномерностью эрозии и литологической неоднородностью прорезаемых грунтов. Кривая распределения ширин асимметричная с модой в точке  $b/\bar{b} = 1.2$ , средним  $b/\bar{b} = 1.0$  и средним значением коэффициента вариации  $Cv = 0.24$ ;  $Cv$  имеет тенденцию увеличиваться до 0.4-0.5 при расходах воды менее 0.3-0.4 л/с.

2. Максимальная глубина потока  $H_m$  зависит в основном от расхода воды

$$h_m = 0.8 Q^{0.45}$$

Она также стохастически изменяется по длине потока, кривая распределения симметрична, мода и среднее приходятся на точку  $H_m/H_m = 1.0$ . Среднее значение коэффициента вариации  $Cv = 0.3$

3. Форма живого сечения в оврагах разнообразная - близкая к треугольной на изогнутых участках, параболическая на прямолинейных, с пониженными глубинами в центре русла на перекатах. В среднем средняя глубина  $h$  составляет

$$h = 0.6 H_m$$

Совместное решение приведенных эмпирических зависимостей с формулой для вычисления расхода воды  $Q = Vbh$  приводит к выражению для средней скорости потока

$$v = 5.2\sqrt{I}Q^{0.3} \quad \text{или} \quad v = \frac{1}{h}\sqrt{Ih}^{2/3}$$

Среднее значение коэффициента шероховатости, по Манингу, равно 0.118.

4. Скорости потока в оврагах существенно изменяются по их длине. Кроме изменчивости площади живого сечения на вариации скоростей сильно влияют изменения уклонов, наличие зон подпора и спада, водоворотные зоны. Для участков длиной 3-5 м коэффициент вариации осредненных по длине максимальных скоростей составляет 0.12, однако

коэффициент вариации скоростей внутри такого участка только из-за изменчивости площади живого сечения может составлять 0.5.

В связи с большой индивидуальностью условий формирования стока наносов во время каждого паводка и в каждом овраге, целесообразно каждый из них рассмотреть в отдельности.

Обложные дожди 5-7 августа 1990 г. привели к формированию суммарного слоя стока 0.3 мм, основная часть осадков пошла на насыщение водой грунта и заполнение микрорельефа на водосборе. Максимальные расходы воды не превышали в устье оврага №1 0.25 л/с, мутность - 13.1 кг/куб.м, расход наносов 0.0033 кг/с. Суммарный вынос материала из оврага за эти дни составил 50-60 кг, при этом большая часть материала поступила в поток в результате оплывания его бортов, где отмечалось существенное увеличение мутности потока. Смыв почвогрунтов с водосбора в результате ручейковой эрозии за время паводка составил 1.2 кг. Максимальные расходы воды в вершине оврага не превышали 0.09 л/с, мутность - 0.76 кг/куб.м, расход наносов 0.00007 кг/с.

Паводок 8 августа со слоем стока 11.1 мм вызвал интенсивную эрозию как на водосборе, так и в русле оврага №1. Основная часть стока воды сошла за период 9-14 часов. За это время с части водосбора площадью 10100 кв.м, примыкающей к вершине оврага, было снесено 4.3 т (2.7 куб.м) материала (или 0.27 мм в слое). Из устьевоего створа оврага было вынесено 22.7 т (14.2 куб.м) наносов. Из русла оврага вымыто 11.5 куб.м грунта, что соответствует слою эрозии 0.16 м (при длине потока в овраге 210 м и средней его ширине 0.35 м).

Сток воды 5-7 августа в овраге №2 также как и в овраге №1, не производил существенной эрозионной работы. В устье оврага расходы воды составляли 0.17 л/с, мутность воды - 4.75-5.0 кг/куб.м, расход наносов -  $7-8 \cdot 10^{-4}$  кг/с. Общий вынос материала из обоих оврагов сопоставимы.

Паводок 8-9 августа оказал существенное воздействие на развитие оврага №2. Эрозия на водосборе, примыкающем к вершине оврага, площадью 28300 кв.м, составила 15817 кг, или смыл 0.35 мм в слое. Из устьевоего створа оврага вынесено 42.7 куб.м материала, что соответствует среднему размыву дна на 0.58 м. Подобный размыв был зафиксирован при визуальном обследовании днища оврага после паводка. Но уже через 2-3 дня после паводка свежий врез начал заполняться материалом, поступающим с бортов оврага.

Наблюдения за стоком в овраге №3 проводились эпизодически, основные закономерности эрозионных процессов здесь совпадают с такими в овраге №2.

Высокая степень эрозионного расчленения территории Бованенковского ГКМ (1.2 км/кв.км) и большие скорости ветра в зимний период приводят к существенному перераспределению по площади высоты и плотности снежного покрова, и, в конечном итоге, запасов воды в снеге к началу периода снеготаяния. Среднегодовой слой стока в период половодья в бассейне Се-Яхи и Морда-Яхи, по данным ГГИ, составляет

220-250 мм. В то же время слой зимних осадков на метеостанциях Ямала, приведенный к показаниям осадкомера, составляет 90-110 мм; величина влагозапасов в снеге в начале снеготаяния на метеостанции Марре-Сале составляет в среднем 57 мм. Эти данные свидетельствуют о том, что основная часть снегозапасов в снеге в начале снеготаяния скапливается в эрозионной сети, а на междуречьях снега остается мало. Этот вывод подтверждается измерениями мощности снега и визуальным исследованием территории.

С началом освоения Бованенковского ГКМ появились новые области накопления снега, связанные с бытовыми и промышленными сооружениями и коммуникациями. Наиболее велика аккумуляция снега в поселках. Так, к началу снеготаяния в поселке КЭХ снеговой покров залегал на всей его территории, причем мощность изменялась по площади от 20 до 200 см, а плотность варьировала от 0.3 до 0.9 г/куб.см. Снеготаяние продолжалось в течение всего июня, наиболее долго снег сохранялся в областях наиболее плотного расположения строений (ЦУБов). Линейное скопление снега отмечено вдоль дорожных искусственных насыпей. Мощность снега составляла здесь 0.3-0.5 м. Важным источником талых вод являются зимники, которые представляют собой полосу укатанного снега (практически льда) мощностью 0.6-0.8 м, шириной 5-7 м и длиной в десятки километров. Если зоны скопления снега в поселках увеличивают сток воды на ограниченном числе овражных водосборов, то линейные скопления снега создают повышенный сток талых вод практически во всех эрозионных формах в зоне освоения ГКМ.

Исследования особенностей и интенсивности эрозионных процессов в период снеготаяния проведены в июне 1991 г. на водосборах и в руслах тех же оврагов. Кроме того, были исследованы системы эрозионных борозд, которые сформировались на их водосборах, а также на склонах между водосборами оврагов.

На момент начала стока в овраге №1 мощность снега составляла 1.5-2.0 м. Водный поток, сформированный на водосборе выше вершины, уходил под снег и в период начала и середины июня выходил на поверхность лишь в районе устья оврага. К концу июня низовья оврага очистились от снега, однако в верхней и средней части сохранились пятна снега.

Средняя часть водосбора оврага №1 была свободна от снега уже в начале июня. Здесь сформировалась разветвленная сеть эрозионных борозд глубиной 0.5-0.7 м и шириной зоны эрозии до 1.5-2.0 м, ширина тальвегов составляла 0.2-0.3 м. В верхней части водосбора на территории пос. КЭХ еще лежал снег, к середине - концу июня он сохранился только в области скопления ЦУБов.

В овраге №2 вершина в основном уже в начале июня освободилась от снега, заполнение им оврага началось ниже. В период увеличения стока воды в вершине оврага мутная вода часто выходила на снег и текла по его поверхности. К середине второй половины июня вдоль всего русла оврага прослеживался открытый поток, текущий по дну оврага, а к концу июня русло оврага полностью очистилось от снега. В

средней части водосбора сеть эрозионных борозд имела морфометрию близкую к описанной выше. В верхней части водосбора, в пределах поселка, мощность снегового покрова была меньше, чем у оврага №1; к 19 июня снег уже полностью стаял.

В овраге N 3 в начале июня на всем его протяжении существовал открытый поток воды, текущий по дну оврага. Иногда он проходил под снежными мостами, и только в устье уходил под снежный покров. Сеть водотоков на водосборе менее выражена из-за меньшей его нарушенности.

Всего по периметру поселка КЭХ формируется до 104 временных водотоков (ручейков) шириной от 5 до 30 см и более. С удалением от поселка вниз по склону их количество уменьшается, что очевидно связано с концентрацией стока на характерных собирающих малых водосборах. Установлено также, что количество ручейков и их размеры зависят не только от объема стока и естественного микрорельефа, но и в значительной степени от изборожденности и степени нарушения поверхности на периферии поселка и прилегающей к нему территории в результате техногенного воздействия. Значительная часть ручейков приурочена к колеям проезда внедорожного транспорта, подъездным дорогам и другим техногенным воздействиям. Ручейки концентрируются в более мощные потоки и поступают по ложбинам и промоинам в уже существующие и действующие береговые овраги Се-Яхи или в замкнутые термокарстовые понижения, образуя характерные конуса выноса.

Интенсивность эрозии в ручейках также как и в оврагах различна и зависит не только от энергии стока, но и от сопротивляемости почвогрунтов смыву и размыву.

Измерение гидравлических параметров потоков воды при талом стоке в ручейках на склонах крутизной от 0.02 до 0.13 показали, что их скорость изменяется от 0.05 м/с до 1.00 м/с. Глубина мала, изменяется в пределах от 0.7 до 3 см. Ширина потоков составляет от 0.1 до 0.35 м. Анализ полевых данных позволил установить ряд закономерностей изменения гидравлических параметров:

1. Коэффициент шероховатости по Маннингу ( $n$ ), изменяется в широких пределах - от 0.16 до 0.02 в зависимости от характеристик почвогрунтов, слагающих русла водотоков. Наименьшие его значения характерны для русел, покрытых льдом и мелкозернистыми наносами, наибольшие - для задернованных русел или имеющих местные сопротивления (уступы, впадины и т.д.).

2. Живое сечение ( $w$ , м<sup>2</sup>) водного потока тесно связано с гидравлическим радиусом ( $R$ , м):  $w=10R^2$ .

3. Ширина потоков в ручейках ( $b$ , м), в данном диапазоне уклонов, зависит в основном от расхода воды ( $Q$ , куб.м/с):  $b=6.3\sqrt{Q}$

В результате изучения физических свойств почвогрунтов, слагающих русла временных эрозионных форм, установлены следующие закономерности:

1. Песчаные и супесчаные водонасыщенные почвогрунты практически не имеют сцепления и сопротивляемость их размыву зависит от размера частиц. Сцепление ( $C$ , т/кв.м) почвогрунтов тяжелосуглинистого состава составляет 0.04-0.14 т/кв.м и определяется нижним пределом пластичности ( $W, \%$ ) и коэффициента пористости ( $\epsilon$ ):

$$C = 2.5 \cdot 10^{-6} / (\epsilon / W^{1.2})^3$$

2. При содержании растительных остатков в слое 0-5 см до 2 г, 2-4 г в 100 куб.см почвогрунта расчетное сцепление ( $C_p$ ) соответственно увеличивается в 5, 10 и более 20 раз.

3. Размер водопрочных агрегатов (частиц) почвогрунтов изменяется в широких пределах от 0.2 до 7-8 мм. Наименьшие значения характерны для легкосуглинистых почвогрунтов, наибольшие - для глинистых и хорошо задернованных.

Ярко выраженная неоднородность почвогрунтов по физическим свойствам, определяющим их противозерозионную стойкость, оказывает заметное влияние на характер проявления эрозионно-аккумулятивного процесса. В руслах, сложенных мерзлыми почвогрунтами, обладающими высокой противозерозионной стойкостью, интенсивность размыва дна зависит от темпов его оттаивания. В то же время смыв может быть значительным при большей скорости оттаивания, оплывания и обрушения боковых стенок водотоков. На песчаных почвогрунтах с характерной для них тиксотропностью и пльвунностью оттаивающие стенки легко оплывают и интенсивно размываются небольшими потоками воды. При суглинистом и глинистом составе мерзлых грунтов оттаявшие блоки стенок обваливаются в поток, рассыпаясь на характерные для этих грунтов текстурные отдельности размером 5-10 мм, которые по мере дальнейшего оттаивания и переноса в потоке превращаются в текучую глинистую массу. В результате поток предельно насыщается наносами.

При взаимодействии талых потоков с оттаявшими почвогрунтами, обладающими меньшей противозерозионной стойкостью, интенсивность смыва резко возрастает в связи с более активным врезом русла и, соответственно, более интенсивным оплыванием (песчаные почвогрунты) и обрушением (глинистые почвогрунты) стенок временных водотоков.

В пределах ручейковых и овражных форм сток наносов в период снеготаяния происходит в сложной форме. В вершины оврагов поступают вода и наносы с водосбора, в это время овраг полностью заполнен снегом. Чем больше сток воды с водосбора, тем быстрее происходит оформление водотока. Так, 6-10 июня в крупном овраге с площадью водосбора 300000 кв.м в вершине, расположенном к востоку от поселка КЭХ, полностью сформировался водоток, прорезавший 3-5-метровую толщу плотного снега, заполняющего овраг. В овраге N 3 при площади водосбора в вершине 104000 кв.м от снега очистилась только верхняя часть оврага. Как и в овраге N 1 с площадью водосбора 10100 кв.м в вершине, водотока на поверхности практически не было.

Когда поток в овраге не оформлен, и вода фильтруется сквозь снег, основная масса наносов остается в снежном покрове. Например, 7 июня в вершину оврага № 1 вливался поток с расходом 0.0048 куб.м/с, мутностью 36.6 кг/куб.м и с расходом наносов 0.176 кг/с. В устье оврага расход воды составлял 0.0226 куб.м/с, мутность - 1.3 кг/куб.м, расход наносов - 0.03 кг/с. Таким образом, 83% наносов (если исключить возможную эрозию) оставались в снегу. Однако такая ситуация не является типичной. Структура снега в оврагах такова, что в порах между кристаллами мелкие наносы не задерживаются. Так 6 июня в вершину оврага №2 поступал поток с мутностью 2.5 кг/куб.м, в его устье из снега просачивалась вода с мутностью 2.66 кг/куб.м. Достаточно скоро в оврагах формируется водоток (под снегом в тоннеле или в промоине - щели), который способен производить эрозионную работу.

Слой стока воды в период 6-27 июня 1991 г. на водосборе в вершине оврага №1 составил 171 мм, оврага №2 - 132 мм. С водосбора оврага №1 было смыто 41т (25.6 куб.м) наносов, с водосбора оврага №2 - 16.87т (10.6 куб.м) наносов, что составляет 2.5 и 0.37 мм в слое, соответственно. За период стока воды из оврага №1 было вынесено 177.2т наносов. Объем его за половодье увеличился на 85 куб.м при врезании на 1.16 м. Из устьевых створов оврага №3 вынесено за период снеготаяния 288.6т, объем оврага увеличился на 150 куб.м, что соответствует врезу 0.8 м. Углубление оврагов сопровождалось их вершинным ростом. За период активного стока талых вод вершина оврага №1 сместилась вверх по руслу на 1.25 м, оврага №2 - на 26.0 м. У оврага №3 две активные вершины: левая, линейная, сдвинулась на 3.9 м, правая, циркуобразная - на 25.0 м. Эти данные показывают, что несмотря на перетолжение наносов в снегу и уменьшение скорости потока процессы овражной термоэрозии и эрозии во время половодья происходят более интенсивно, чем в период осенних дождей из-за существенно большей интенсивности водоотдачи водосбора.

Приведенное описание и количественная оценка эрозионных процессов при дождях и снеготаянии свидетельствуют о том, что при современном уровне знаний о процессах формирования русел ручейков и оврагов невозможно учесть весь комплекс факторов и процессов, определяющих развитие этих форм. Поэтому предлагаемая методика расчета опирается на следующую упрощенную концепцию.

1. В ходе эрозионного и термоэрозионного процессов размыва талых и мерзлых грунтов, транспорта продуктов размыва и их отложения образуется эрозионный врез. Форма его продольного профиля определяется уравнением деформации.

2. В период между паводками поперечный профиль эрозионного вреза в условиях развития многолетнемерзлых грунтов трансформируется склоновыми процессами - оползанием, оплыванием грунта и пр. Формируются устойчивый откос, прямые и слабовыпуклые склоны эрозионных форм, прямоугольный врез трансформируется в трапецию с параметрами, зависящими от угла устойчивого естественного откоса.

3. Баланс взвешенных наносов определяется уравнением неразрывности для дисперсоида.

Теоретический анализ уравнений движения взвесенесущего потока и данные наблюдений за интенсивностью овражной эрозии показывают, что процессы размыва - аккумуляции наносов в эрозионных формах описываются уравнением:

$$\frac{1}{b} \frac{dQ_s}{dx} = v_{\tau} S_0 - K_0 U S_{cp}$$

где  $b$  - средняя ширина потока,  $Q_s$  - объемный расход взвешенных наносов,  $x$  - продольная координата,  $v_{\tau}$  - скорость взмыва частиц наносов,  $S_0$  - донная мутность,  $U$  - гидравлическая крупность,  $K_0$  - коэффициент осаждаемости наносов. Интенсивность взмыва наносов в случае размыва талых грунтов представляется в виде:

$$v_{\tau} S_0 = K_s \left( \frac{v - v_n}{v_n} \right)^3 \cdot v$$

где  $v_{\tau}$  - средняя скорость потока,  $v_n$  - неразмывающая скорость,  $K_s$  - коэффициент эродируемости грунтов. В случае размыва мерзлых грунтов интенсивность взмыва наносов определяется температурой потока  $T^{\circ}C$ :

$$v_{\tau} S_0 = K_{ms} T,$$

где  $K_{ms}$  - коэффициент термоэрозии.

В процессе апробации разработанной модели прогноза интенсивности овражной эрозии применительно к условиям Бованенковского ГКМ установлено, что для замыкания системы дифференциальных уравнений, описывающих деформации продольного профиля оврага, целесообразно использовать эмпирическую формулу для расчета интенсивности взмыва наносов с днища оврага:

$$v_{\tau} S_0 = K_s q I,$$

где  $q$  - удельный расход воды,  $I$  - уклон свободной поверхности воды. Эта формула получена на основе массовых полевых измерений гидравлических, морфометрических и динамических характеристик потоков в эрозионных формах в условиях стока вод в период снеготаяния, осенних дождей, искусственных потоков на талых и мерзлых грунтах различного механического состава - глинах, суглинках и песках (рис. 1). На основании базовых уравнений деформации, баланса наносов и формул для расчета интенсивности размыва при эрозии талых грунтов и термоэро-

$$\frac{1}{b} \frac{dQ_s}{dx} + \omega_0 S_{cp}$$

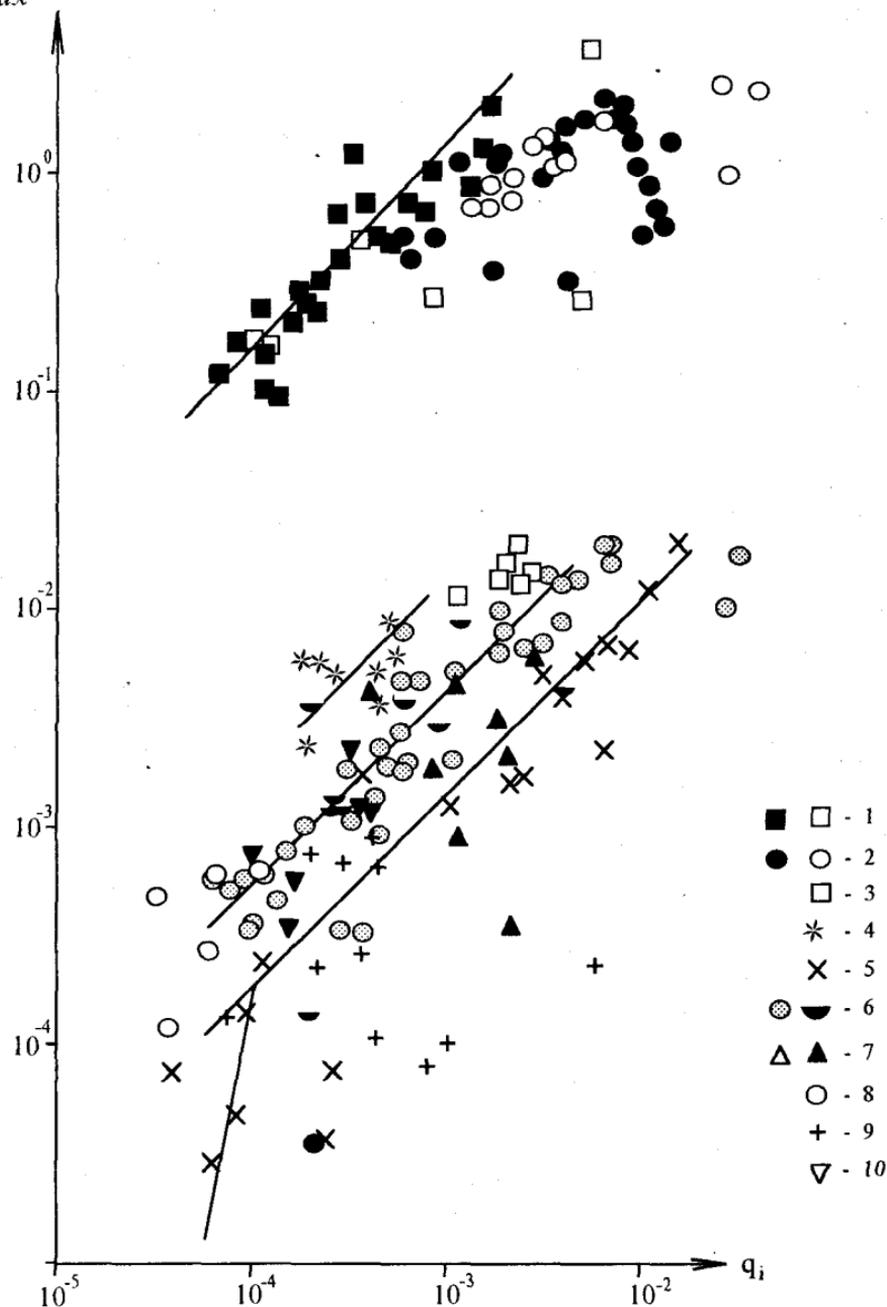


Рис.1. Зависимость интенсивности ручейковой и овражной эрозии от гидравлических характеристик потока в руслах:

1, 2, 3- искусственно созданные лотки при модельных опытах, 5, 6, 7 - оврагов, 4, 8, 9, 10 - ручьев.

зии составлены дифференциальные уравнения для расчета трансформации продольного профиля эрозионной формы соответственно при эрозии и термоэрозии. Для определения величины основного слагаемого этих уравнений проводится интегрирование уравнения баланса наносов по длине оврага с использованием явной четырехчленной двухуровневой системы типа предиктор-корректор в случае размыва талых почвогрунтов и схемы со стандартной разностью вперед при размыве мерзлых почвогрунтов. Таким образом, предлагаемая модель, в которой деформация продольного профиля эрозионной формы базируется на системе уравнений динамики взвесенесущего потока (дисперсоида) и уравнений деформации, развитие поперечного профиля моделируется на основе условий формирования устойчивого откоса склона, относится к классу динамических моделей. Основные коэффициенты, входящие в расчетные уравнения, определяются на основе натуральных измерений. По данным эксперимента для овражной эрозии в области развития многолетнемерзлых пород  $K_0 = 1.3$  для песков,  $6.2 \cdot 10^{-2}$  для суглинков,  $.2 \cdot 10^{-3}$  для глин. Коэффициент осаждаемости наносов ( $K_0$ ) определяется в ходе решения задачи с прогноза овражной эрозии. Широкий диапазон изменения значений коэффициента эродированности ( $K_0$ ) делает гранулометрический агрегатный состав грунтов и их связность важнейшим фактором эрозионных процессов.

В результате применения разработанной методики прогноза интенсивности овражной эрозии была составлена в масштабе 1:25000 прогнозная карта схема развития овражной эрозии на территории Бованенковского ГКМ (рис.2). Она наглядно показывает потенциальную опасность овражной эрозии для ряда инженерных сооружений поселка КЭХ по истечении 50 лет и необходимость проведения противоэрозионных мероприятий уже в настоящее время.

### Русловая эрозия

Размыв пойменных и террасовых берегов при естественном смещении русловых форм на реках Ямала может достигать скоростей, представляющих опасность для расположенных вблизи инженерных сооружений. При этом особое внимание следует уделять участкам недавних крупных перестроек русла, либо тем участкам, где подобные перестройки возможны в ближайшем будущем. Наибольший интерес представляет развивающееся потенциальное сближение отдельных излучин русла, а также спрямления серий излучин пойменными потоками. В таких местах в относительно короткие отрезки времени происходят значительные смещения русла, сопровождающиеся размывами берегов, темпы которых существенно превышают средние многолетние значения. При этом, как правило, на значительном протяжении меняются не только темпы размыва берегов, но и направленность русловых деформаций.

Основным методом анализа и темпов деформации при меандрировании русел явилось дешифрирование аэрофотоснимков, по которым

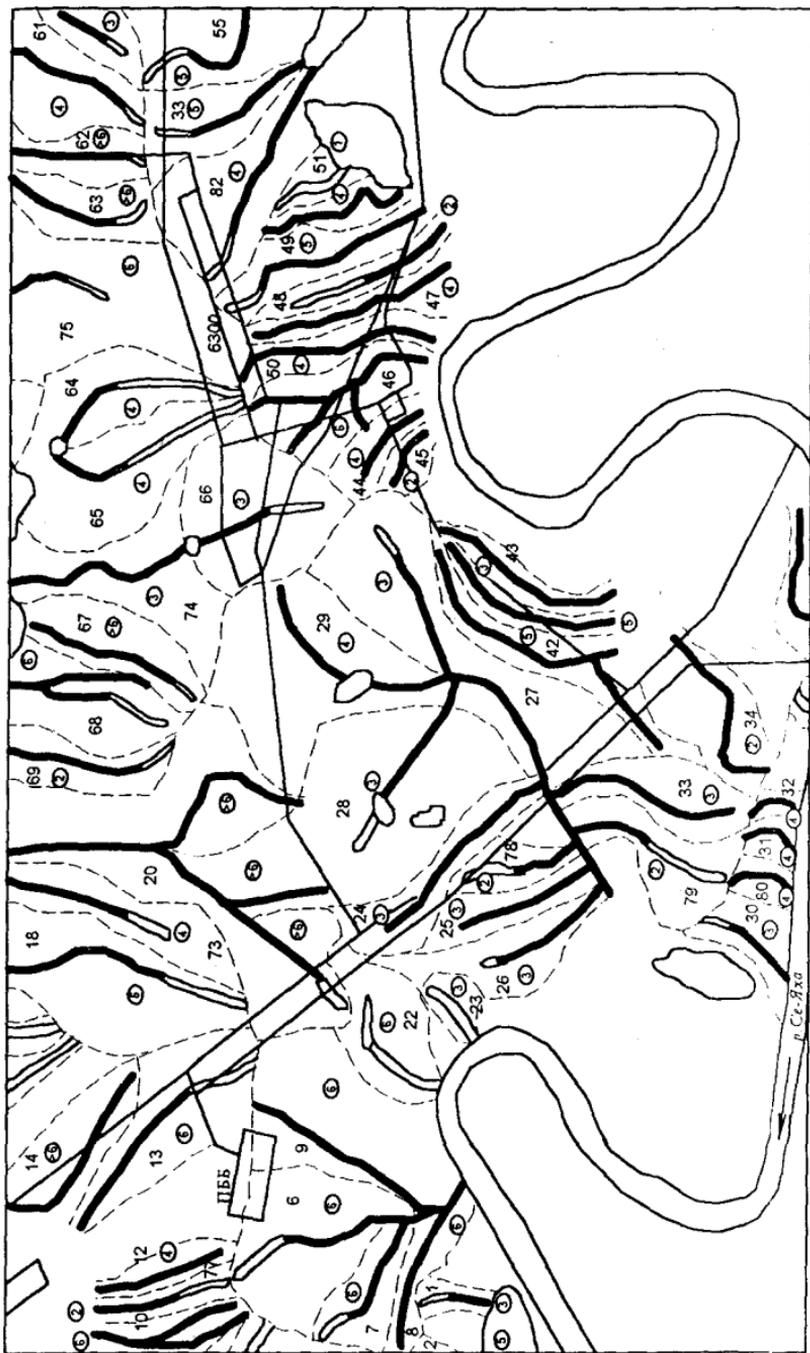


Рис. 2. Карта-схема "Прогноз развития овражной эрозии на территории обустройства Бованенковского ГКМ", масштаб 1:25000: 1 - *талвег эрозийной формы* (а - *врез 1 м*; б - *врез 1 м*); 2 - *современный водосбор эрозийной формы*; 3 - *максимальная глубина вреза оврага за 50 лет*; 4 - *озеро*; 5 - *схема обустройства*.

определялось последовательное положение русла в прошлом. В процессе полевых работ в характерных точках пойменных сегментов отобраны образцы торфа для радиоуглеродного датирования. Полученные данные позволили определить средние за длительные отрезки времени темпы смещения крупных форм русла и связанные с ними скорости размыва берегов, а также датировать этапы русловых перестроек.

Выделяется несколько генераций поймы. Молодая (до 200 лет) сегментно-гривистая пойма окаймляет выпуклые берега излучин. Ее ширина дает представление о средних за 200 лет темпах наращивания аккумулятивных берегов. Экстраполяция полученных средних скоростей смещения русла позволила оценить вероятный размыв берегов на ближайшие 50 лет. Большую часть шпор излучин составляет зрелая сегментно-гривистая пойма. Возраст ее - 200-1900 лет. Для нее характерен полигонально-валиковый микрорельеф, в тыловых, наиболее древних частях местами располагаются термокарстовые озера. Следующий пойменный уровень, как правило, примыкает к предыдущему у основания пойменных сегментов вблизи террасовых бортов долины. Поверхность его переработана термокарстовыми процессами, имеет развитый полигонально-валиковый микрорельеф. Такие участки поймы - старше 1900 лет (одна из датировок - 2300 лет).

Наибольшую площадь занимает пойменная поверхность, полностью преобразованная вторичными процессами. Для нее характерен микрорельеф и растительность, отражающие различные стадии существования термокарстовых озер и хасыреев. Возраст - более 1300 лет; нижняя возрастная граница не установлена.

Для оценки средних темпов русловых деформаций использовался дендрохронологический метод. Наиболее низкая и молодая пойменная ступень представлена верхними частями прирусловых отмелей, покрытыми травянистой растительностью. Более высокие и удаленные от русла участки покрыты карликовой ивой; вглубь поймы наблюдается отчетливое увеличение ее возраста - от ростков до зрелых растений. Принимая скорость выдвигания пойменного берега постоянной, средние ее значения можно определить, разделив ширину полосы от ростков ивы до зрелых растений на возраст последних. Тогда ширина полосы молодой травянистой поймы, поделенная на среднюю скорость выдвигания берега, дает возраст этого пойменного уровня. По данным, полученным для 4 профилей на правом берегу в нижнем крыле излучины в районе КЭХ, средний возраст составил около 40 лет (табл.4).

Сравнение результатов датирования пойменных уровней дендрохронологическим и радиоуглеродным методами свидетельствует об их совпадении. На большинстве участков рек Се-Яхи и Морды-Яхи темпы размыва берегов не превышают 1 м/год. Исключение представляют участки вогнутых берегов в вершинах активно развивающихся излучин, а также места недавних русловых перестроек.

Средние за 200 лет скорости размыва вогнутых пойменных берегов в вершинах свободных излучин Се-Яхи составляют 0.5-0.7 м/год. Высокие террасовые берега в вершинах адаптированных излучин размываются

практически с теми же скоростями - 0.4-0.6 м/год. На Морда-Яхе максимальные скорости (1.0-1.5 м/год) отмечены на свободных излучинах ниже слияния с Се-Яхой. Выше по течению средние скорости смещения излучин составляют 0.7-0.8 м/год.

Таблица 4

**Характеристика и возраст молодой поймы р.Се-Яхи**

№ профиля	Травянистая пойма		Кустарничковая пойма			Средняя скорость выдвигания берега, м/год	Возраст молодой поймы
	ширина, м	превышение, м	ширина, м	превышение, м	возраст ивы		
1	23.5	1.91	10.5	0.32	24	0.44	53
2	21.8	1.68	12.2	0.34	18	0.68	32
3	33.6	1.87	14.4	0.09	16	0.90	37
4	37.5	2.07	13.0	0.05	15	0.87	43

Причина близких темпов смещения свободных и адаптированных излучин состоит, по-видимому, в интенсивном разрушении террасовых берегов за счет термоэрозии и криогенных склоновых процессов. Неодинаковая активность проявления солифлюкции и быстрых сплавов на подмываемых террасовых берегах придает им фестончатую форму, способствующую возникновению водоворотных зон и глубоких ям в русле. В то же время поступающий в русло со склонов мелкозернистый материал легко размывается потоком. Также практически не оказывает замедляющего воздействия на размыв террасовых берегов, поступление материала из приуроченных к этим участкам термоэрозионных оврагов. Мелкозернистый пролювий размывается рекой и не образует конусов выноса. Максимальная скорость размыва вогнутого террасового берега адаптированной излучины в районе КЭХ достигает 0.6 м/год; прогнозируемый на 50 лет размыв составит 15-30 м.

Участки спрямления одиночных излучин отчетливо фиксируются по данным дешифрирования аэрофотоснимков в виде старичных озер и депрессий. Излучины рек Се-Яхи и Морда-Яхи спрямляются при достижении ими петлеобразной формы за счет сближения крыльев и разработки полыми водами спрямляющего прорыва у основания шпоры. степень развитости излучин в момент спрямления - соотношение длины русла на излучине и ее шага - составляет в среднем около 7. Подобные условия спрямления, как правило, свидетельствует о небольшой мощности идущего по поверхности поймы потока или о слабой размываемости пойменных отложений. в данном случае, очевидно, играет роль то обстоятельство, что поток половодья проходит по еще не оттаявшей поверхности поймы, сложенной торфом.

Наиболее недавними (30-40 лет назад) являются спрямления адаптированной излучины Морда-Яхи и свободной излучины Се-Яхи ниже КЭХ. 40-50 лет назад произошло спрямление адаптированной излучины выше КЭХ, 70-80 лет назад - свободной излучины Се-Яхи выше устья. Самое раннее из зафиксированных одиночных спрямлений Се-Яхи датировано приблизительно 1400-1800 годами. Спрямление оди-

ловых деформаций на вновь образующихся русловых формах. Так, например, скорость смещения свободной излучины, образовавшейся на месте спрямления выше КЭХ составляет до 2.5-2.7 м/год, т.е. превышает средние для участка темпы почти в 5 раз.

Спрямления серий излучин пойменными потоками отмечены на приустьевом участке Се-Яхи. Им способствует большая извилистость основного русла и специфика рельефа поймы. Пойменные потоки развиваются по старичным понижениям, ложбинам, связующим термокарстовые озера и хасыреи, и приобретают, таким образом, изначально извилистую форму. Новое русло активно приспособляется к изменившейся водности потока; темпы деформаций при этом существенно превышают средние. На Се-Яхе спрямление серии излучин произошло 200-250 лет тому назад. Темпы размыва пойменных берегов вновь образовавшихся излучин достигают 1.5-2.0 м/год, т.е. превышают средние в 3-4 раза. Здесь же, в связи с весьма извилистой формой нового рукава существует реальная возможность спрямления одиночных излучин. На крутой петлеобразной излучине с вершиной в районе впадения р. Пелхато-Се за ближайшие 50 лет перешеек у основания шпоры сузится с 260 до 180 м. Активизация спрямления серий и одиночных излучин может способствовать антропогенное воздействие на рельеф поймы, в частности, строительство инженерных сооружений (дорожных насыпей, отсыпок под здания и т.д.), способных создавать локальные перепады уровней водной поверхности, канализировать сток полых вод.

Данные дендрохронологического и радиоуглеродного датирования позволяют также оценить скорость наращивания поймы в высоту. Поверхность травянистой поймы в результате ежегодного отложения пойменной фации аллювия повышается в среднем на 5 см. С ростом высоты поймы темпы отложения наилка снижаются, составляя 0.3-1.4 см/год для наиболее молодых участков кустарничковой поймы. На одном из участков зрелой сегментно-гривистой поймы в разрезе подмываемого берега отобраны 2 образца торфа. Возраст нижнего (1.35-1.5 м от поверхности поймы) составил 1800 лет; верхнего (1.1-1.2 м от поверхности) - 1430 лет. Таким образом, темпы отложения наилка не превышают 0.7 мм/год.

### Заключение

Изложенные данные являются результатами первой попытки комплексного изучения развития на Ямале всех форм проявления эрозионных процессов с учетом антропогенного воздействия. В сложной ситуации, сложившейся в районах освоения тундры, разработка и выбор противозерозионных мер должны проводиться на основе использования физически обоснованных моделей количественного прогноза. Для этих целей наиболее перспективно применение уравнений гидромеханики для расчета баланса масс взвешенного потока. Однако это не исключает необходимость дальнейших натуральных и модельных исследований эрозионных процессов в районах Крайнего Севера.