

## Эрозионные процессы при нефтегазодобыче в условиях Крайнего Севера

А. В. Баранов

АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ БАРАНОВ — доктор географических наук, ведущий научный сотрудник ВНИИГАЗ. Область научных интересов: геоэкология.

142717, пос. Развилка Ленинского р-на Московской обл., ВНИИГАЗ, тел. (095) 355-90-62, E-mail akorova@nv.vniigaz.gazprom.ru

Среди множества проблем, связанных с добычей углеводородного сырья в ареале криолитозоны и его транспортом, особое место занимают проблемы геоэкологического плана. Их острота обусловлена хозяйственным освоением арктических территорий, когда активизируются естественные водноэрозионные и другие процессы деструкции почвогрунтов. Заметим, что при естественном состоянии природных ландшафтов интенсивность эрозионных и термоэрозионных процессов, протекающих в криолитозоне, весьма малая.

В настоящей статье рассматриваются геоэкологические аспекты развития водноэрозионных процессов в районах освоения нефтегазовых месторождений на полуострове Ямал [1].

П-в Ямал простирается с севера на юг на 750 км и охватывает ландшафты от арктической тундры до лесотундры, т.е. те районы криолитозоны, в которых ведется основная добыча углеводородов. Слой твердых и жидких осадков на полуострове составляет порядка 200—300 мм/год, и несмотря на то, что вода практически не впитывается в мерзлый грунт, поверхностный сток отсутствует из-за высокой водопоглощающей способности торфяного покрова. В таких условиях плоскостной смыв почвогрунтов незначителен даже на заметно крутых склонах (уклон до 10°), характерных для территории п-ва Ямал. При этом линейная эрозия почвы в естественном состоянии развивается только при наличии на местности перепадов высот (уступы террас, берега озер) и существенно сдерживается большой эрозионной устойчивостью дерново-торфяного слоя.

Ситуация коренным образом изменяется при разрушении целостности растительного покрова, что неизбежно при современных методах хозяйственного освоения криолитозоны.

В настоящее время на Ямале выявлены 17 месторождений углеводородного сырья, в том числе четыре газовых, семь газоконденсатных и шесть нефтегазоконденсатных. С началом их освоения заметно усилилась антропогенная нагрузка на природные экосистемы. Особенно значительны разрушения почвенно-растительного покрова, наносимые при механических повреждениях почвогрунтов.

В результате таких нарушений устойчивость к эрозии тундровых почвогрунтов сильно снижается. Так, механическая устойчивость тундровых почв не превышает 3—12 кг/см<sup>2</sup> [2], что на 1—2 порядка ниже существующих антропогенных нагрузок. Низкая ус-

тойчивость мерзлотных тундровых почв объясняется тем, что органогенные горизонты, в которых сосредоточена основная масса корней, слабо связаны с минеральной частью профиля почвы и легко разрушаются при механических нагрузках.

Физические свойства тундровых почв, влияние на них механических нагрузок детально исследованы Н.П. Бучкиной [3]. Анализ этих данных показывает, что основные изменения физического состояния почв на глубине до 10 см связаны с преобразованием органогенных горизонтов в органогенно-минеральные под воздействием нагрузок от транспорта.

При этом глубинное уплотнение почв зависит не только от количества проездов, но и от положения их в рельефе, а также от мощности органогенных горизонтов. Характеристики физического состояния нарушенных и естественных почв представлены в таблице.

При обширных механических нарушениях плакорных\* почв происходит их иссушение, активизируются окислительные процессы. В верхних горизонтах почв снижается гидrolитическая кислотность, уменьшается содержание азота и углерода, сужаются пределы отношения углерода к азоту. Так, в глееземах\*\* гидrolитическая кислотность снижается с 40—45 мг-экв до 4—18 мг-экв/100 г почвы, отношение углерода к азоту — с 25—28 до 11—18 [4].

Механические нарушения поверхности тундры вызывают радикальные изменения структуры почвенного покрова, в основном, на уровне элементарных почвенных ареалов и элементарных почвенных структур. В случае сложных почвенных комбинаций на их месте формируются «антропогенные земли» с усредненными свойствами. В этих почвах нарушается естественное чередование горизонтов, возрастает мощность сезонно-талого слоя, что приводит к протаиванию грунтовых льдов и интенсивному развитию водноэрозионных процессов. При этом противоэрозионная стойкость почв определяется сопротивлением совместному воздействию капель дождя и потоков воды. Количество противоэрозионная стойкость оценивается критической (размывающей) скоростью потока. К свойствам, непосредственно влияющим на размывающую скорость потока, можно отнести такие, как размер водопрочных агрегатов грунта и силу сцепления между ними. Поскольку эти данные не всегда имеются

\* Плакор — плоский суглинистый дренированный водораздел.

\*\* Глеезем — почва, где под маломощным органическим слоем находится глеевый горизонт, образованный при недостатке кислорода за счет переувлажнения (обводнения).

Таблица

Характеристики физического состояния верхних горизонтов почв в колеях (пять лет спустя после воздействия) и их ненарушенных аналогов

Местоположение	Количество проездов транспорта	Глубина отбора образца, см	Гидролитическая влажность, %	Полная влагоемкость, %	Содержание общего углерода, %
Плакор	0	0,5	6,5	179,5	47,3*
	0	9—19	1,3	35,3	0,9
	4	0—8	1,3	44,3	1,6
	4	9—19	1,7	49,2	1,5
Склон	0	0—6	6,0	241,2	40,0*
	0	6—14	1,0	40,1	0,7
	4	0—6	2,7	98,7	3,7
	4	7—15	1,4	40,8	0,9
Пойма	0	0,10	0,6	42,5	0,4
	4	0—10	0,9	47,0	1,1
	4	15—25	0,7	30,9	0,4

\* Потери при прокаливании.

для оцениваемых почв, косвенно о них можно судить по таким свойствам почвогрунтов, как гранулометрический состав, запас гумуса и корней, плотность сложения и плотность агрегатов, оструктуренность, исходная влажность, льдистость почвы.

Анализ литературных данных свидетельствует о том, что многие показатели, используемые для оценки противоэрозионной устойчивости почв, взаимосвязаны между собой. Например, интенсивность водноэрозионных процессов в значительной мере зависит от связности нарушенных почвогрунтов, которая в свою очередь зависит от их физических и химических свойств и от степени развития растительности. При этом глубина протаивания (мощность деятельного слоя) тесно связана с теплоизолирующими свойствами почвенно-растительного покрова. Степень развития растительности определяется реальным плодородием нарушенных почвогрунтов, обусловленным агрохимическими свойствами и гумусным их состоянием. Содержание питательных элементов и гумуса в почвогрунтах в свою очередь зависит от характеристик почвенно-растительного покрова и т.д.

При всем многообразии тундровых почв наиболее высокой противоэрозионной устойчивостью обладают суглинистые глееземы и торфяно-глееземы с достаточно мощным торфянисто-перегнойным или перегнойным горизонтом, а также слоистые торфяные почвы. Почвы мест, лишенных растительности, и супесчано-песчаные глееземы, содержащие меньше гумуса и запаса подземной фитомассы, значительно менее противоэрозионно устойчивы [4].

Малая мощность органогенного слоя и резкое снижение по глубине противоэрозионной стойкости тундровых почв является одной из основных причин активизации эрозионных процессов после антропогенного нарушения почвенно-растительного покрова. При этом естественный эрозионный потенциал возрастает не только вследствие техногенного нарушения растительного и почвенного покрова, но и в результа-

те увеличения стока воды с водосборов за счет накопления снега у инженерных сооружений и дорог, вследствие увеличения коэффициента стока на непроницаемых покрытиях зданий и дорог, сбросов отепленных хозяйственно-бытовых вод и т.д. Для каждого типа этих воздействий набор антропогенных факторов склоновой эрозии индивидуален и вряд ли можно определенно представить региональные детали влияния всех их на интенсивность эрозии тундровых почв.

Тем не менее рассмотрение существующих в настоящее время прогнозных вариантов-сценариев нарушения позволяет судить о возможных последствиях техногенных воздействий при добыче углеводородного сырья в условиях Крайнего Севера.

Выделены три стадии возможного нарушения почвенно-растительного покрова тундровой зоны.

*Слабое нарушение* — нарушено менее 30% почвенного покрова, органогенные горизонты почв смяты, уплотнены, частично собраны или перемешаны с нижележащими глеевыми горизонтами. Такие нарушения, в основном, вызваны внедорожными проездами транспорта.

*Среднее нарушение* — нарушено 30—50% поверхности почв, растительный покров и торф перемешаны с глеевыми горизонтами на глубину до 30 см, глубина оттаивания увеличивается 1,5 раза. Причины: планировка поверхности, многократные проезды транспорта.

*Сильное нарушение* — нарушено до 90—100% поверхности почв, уничтожены или перемешаны верхние горизонты, на поверхность выходят почвообразующие породы, глубина оттаивания увеличивается в два раза. Наблюдается при планировке местности, создании насыпей, разработке карьеров.

В результате техногенных воздействий противоэрозионная стойкость тундровых почв на участках разной степени нарушения почвенно-растительного покрова изменяется соответственно в 1,5; 2 и до 6 раз. При этом интенсивность смыва почв только за счет



Фото 1. Начальная стадия эрозии вдоль гусеничной колеи



Фото 2. Эрозионная рытвина на площадке базы бурения (Бованенковское ГКМ, п-в Ямал)

уменьшения их противоэрозионной стойкости увеличивается от 2 до 130 раз на сильнонарушенных участках. Если за фоновую интенсивность смыва принять значение 0,2 т/га в год, то интенсивность возможного смыва при слабом, среднем и сильном нарушении поверхности почв соответственно составит 0,4; 0,9 и 26 т/га в год [1].

Ускоренной плоскостной и линейной эрозии действуют также такие природные факторы, как

- низкая, практически нулевая, водопроницаемость мерзлых грунтов;
- обилие криогенных форм рельефа, способствующих концентрации стока;
- высокая льдистость пород, которая при деградации мерзлоты становится дополнительным источником поверхностного стока;
- высокая обводненность тундры, которая при появлении эрозионной сети также будет ее поддерживать;
- низкая противоэрозионная устойчивость талых грунтов.

Влияние этих факторов в большинстве случаев значительнее, чем действие первоначальных антропогенных нарушений почвенно-растительного покрова. В условиях антропогенного воздействия активизация водноэрозионных процессов обусловлена концентрацией поверхностного стока и уменьшением внутренней устойчивости нарушенных почвогрунтов. Следовательно, сочетание высокого эрозионного потенциала и антропогенных воздействий способствует экстремальным темпам ручейковой и овражной эрозии при нефтегазодобыче в условиях Крайнего Севера. В результате этих воздействий создается постоянная эрозионная сеть, периодически размываемая дождевыми и тальми водами. Так, на склонах с нарушенным почвенно-растительным покровом и нерегулируемым микрорельефом при талом и дождевом стоке формируется дендровидная сеть эрозионных борозд глубиной от 0,05 до 0,6 м и шириной от 0,3 до 1,5 м. Их густота составляет 0,1 м/м<sup>2</sup> в верхних частях и 0,05 м/м<sup>2</sup> в средних частях склонов. В нижних частях склонов эрозионные борозды укрупняются, число их уменьшается, при этом они трансформируются в отдельные крупные промоины и отвески оврагов (активно развивающиеся вершины), поэтому при последующих паводках талый или дождевой сток в виде

ручьев стекает по уже сформировавшимся руслам эрозионной сети и производит интенсивный размыв и смыв почвогрунтов. При этом наблюдается постоянное укрупнение эрозионных форм от мелких бороздок (фото 1, 2) до оврагов (фото 3, 4).

Независимо от участков эрозионной сети смыв и размыв тундровых почвогрунтов при талом и дождевом стоке осуществляется в основном ручейковыми потоками, имеющими постоянные русла. Ступенчатость дна многих русел способствует местным (интенсивным) размывам и предельному насыщению потоков наносами. Плоскостная эрозия, имеющая место на межручейковых участках и стенках крупных эрозионных образований, в меньшей степени вызывает смыв и размыв почвогрунтов, она обеспечивает лишь насыщение ручейковых потоков наносами.

Более крупные потоки, возникающие при снеготаянии и выпадении стокообразующих дождей, способствуют развитию овражной эрозии, представляющей собой единый процесс формирования овражно-балочной сети под воздействием постоянных и русловых потоков и склоновых процессов. Временные русловые потоки производят разрушения почвогрунтов в русле, вызывают транспорт и вынос из оврагов продуктов разрушения в ходе эрозионных, термоэрозион-



Фото 3. Активно развивающийся овраг на западной окраине вахтового поселка энергетиков (Бованенковское ГКМ, п-в Ямал)



Фото 4. Размыв основания мачты ЛЭП антропогенным отверстием оврага (Бованенковское ГКМ, п-в Ямал)

ных и склоновых процессов. В результате объем оврагов увеличивается, происходит их углубление и расширение днищ, стимулируются гравитационные процессы на склонах и в вершинах оврагов как при углублении и расширении днищ, так и в результате роста оврагов. При этом размывающая деятельность временных потоков определяет длину оврагов и форму их продольного профиля.

Склоновые гравитационные процессы производят выполаживание откосов оврагов, формируют их поперечный профиль, увеличивают ширину оврагов в бровках, их площадь и объем. Эти процессы часто приводят к отступанию крутого уступа оврага параллельно самому себе, в результате происходит расширение оврагов и их рост в длину.

Немаловажными являются процессы физического и химического выветривания размываемых грунтов в промежутках между эпизодами стока, их набухание и последующее высыхание, замерзание со льдообразованием и оттаивание с разрушением криогенной текстуры. При этом существенным образом изменяются инженерно-геологические свойства грунтов, их агрегатный состав и связность, устойчивость к размыву. Ослабление грунтов в промежутках между эпизодами стока приводит к тому, что под действием временных водотоков развивается эрозия даже в таких грунтах, которые по своим гидравлическим характеристикам не должны размываться потоками.

Техногенное увеличение размывающей способности временных водотоков приводит к формированию антропогенных оврагов.

Главными антропогенными факторами оврагообразования являются: площадное или линейное нарушение сплошности растительного и торфяного покрова; изменение распределения и избыточное накопление

влаги на овражных водосборах; изменение площадей водосборов; изменение температуры поверхностных вод; создание линейных коллекторов стока воды; изменение коэффициентов стока воды с водосборов.

На центральном Ямале до начала освоения Бованенковского газоконденсатного месторождения (начало 1990-х годов) овраги и балки, образовавшиеся как на возвышенных, так и на низменных территориях, развивались как естественные формы и полностью контролировались природными факторами. В настоящее время на территории этого месторождения появились овраги антропогенного происхождения. Они сформировались из естественных коротких береговых оврагов длиной не более 50 м, широко развитых на крутом уступе высокого правого берега реки Се-Яхи (фото 5).

В результате нарушения целостности почвенно-растительного покрова на водосборах и дополнительного поступления воды с хозяйственных объектов длина антропогенных оврагов может увеличиваться и достигнуть от 300 до 600 м и более, причем интенсивность развития подобных антропогенных оврагов катастрофически высокая. Так, средняя скорость овражной эрозии на суглинках составляет 20—30 м за период снеготаяния и 0,5—1,0 м за период дождей. На песках при нарушенном растительном покрове (район песчаного карьера) скорость роста оврагов достигает 5—10 м/ч [4].

Протеканию эрозионных процессов на склонах, сложенных суглинистыми отложениями, способствует также вязко-пластическое движение грунта. Этот процесс может развиваться быстро (оползни-сплывы) и медленно (солифлюкция).

По существующим представлениям оползни-сплывы могут возникать самопроизвольно во льдонасыщенных грунтах сезонно-талого слоя после его полного оттаивания, а также вследствие нарушения теплообмена на поверхности склонов, сложенных высокольдистыми породами. Кроме того, оползни развиваются в случае подрезки оснований таких склонов как естественными эрозионными процессами, так и в ходе хозяйственного освоения территорий. В результате на склонах образуются протяженные полосы оголенного тонкодисперсного легкоразмываемого грунта, в пределах которых могут впоследствии развиваться процессы смыва и овражной эрозии.



Фото 5. Развитие системы антропогенной береговой эрозии в районе вахтового поселка энергетиков (Бованенковское ГКМ п-в Ямал)

Возникновение криогенных оползней-сплывов остается наименее изученным процессом. Между тем именно они представляют максимальную опасность при освоении нефтяных и газовых месторождений северной части криолитозоны. Так, в конце лета 1989 года на центральном Ямале был зарегистрирован массовый сход криогенных сплывов в виде двух кратковременных вспышек активности: 15—18 и 27—30 августа. В результате схода сплывов обширные участки задернованных склонов были полностью оголены. Обследование показало, что сплывы возникли на склонах, сложенных из суглинков различной морфологии, крутизны и экспозиции. Причем сплывы зародились в верхних, средних и даже нижних частях склонов, а их сход перекрыл во многих местах мелкие долины. Оползни-сплывы перегородили водотоки, в результате чего возникло множество озер [5].

Слабая изученность сплывов и их большая практическая значимость позволяют отнести данный вопрос к разряду проблемных. В этой проблеме наиболее интересными и важными аспектами по-прежнему остаются механизм образования и динамика развития сплывов. Не имея четких представлений о том, почему и как они возникают, невозможно достоверно определить сценарий их развития и, следовательно, ответить на практически важные вопросы о характере движения сплывов и степени их опасного воздействия на инженерные объекты нефтегазодобывающего комплекса.

Таким образом, техногенные нагрузки, связанные с освоением нефтегазовых месторождений в ареале криолитозоны, активизируют водноэрозионные и солифлюкционные процессы. Происходит увеличение площади тундры, лишенной растительного покрова и

органогенного слоя почвы, защищающих ее от эрозии. В результате на территории расположения объектов нефтегазодобывающего комплекса широкое распространение получает ручейковая и овражная эрозия, а также оползни и сплывы, которые могут привести к полному уничтожению почвенного покрова и повреждению инженерных объектов.

К настоящему времени назрела острая необходимость в разработке и проведении мер по предупреждению и предотвращению последствий опасного развития процессов эрозии в районах промышленного освоения Крайнего Севера.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Баранов А.В.* Геоэкологические основы развития и предупреждения водноэрозионных процессов в криолитозоне при промышленном освоении газовых месторождений полуострова Ямал. Автореферат докт. дис. Москва, 2002, 46 с.
2. *Бучкина Н.П.* Почвы типичной тундры полуострова Ямал. Автореферат канд. дис. СПб, 1966, 18 с.
3. *Дедков В.С.* Диагностика антропогенных почв тундры. Тез. докл. II Съезда общества почвоведов России. Кн. 2. СПб, 1996, с. 39—40.
4. *Сидорчук А.Ю., Баранов А.В.* Эрозионные процессы центрального Ямала. СПб, 1999, 349 с.
5. Оценка проявления овражной эрозии на территории Бованенковского ГКМ. Тез. докл. междунар. конф. «Охрана окружающей среды при поисках, разведке, разработке месторождений углеводородного сырья, его переработка и транспорт». 25—29 ноября 1996 г., СПб, с. 28—29.