

Беляев В.Р., **Зорина Е.Ф.**, Ковалев С.Н., Сурков В.В.,
Веретенникова М.В., Никольская И.И., Прохорова С.Д.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

**ОЦЕНКА ИНТЕНСИВНОСТИ ЭРОЗИОННО-АККУМУЛЯТИВНЫХ
ПРОЦЕССОВ НА ПЕРЕХОДАХ МАГИСТРАЛЬНЫХ
ТРУБОПРОВОДОВ ЧЕРЕЗ МАЛЫЕ ДОЛИНЫ (НА ПРИМЕРЕ
ОРЕНБУРГСКОЙ И ВОЛГОГРАДСКОЙ ОБЛАСТЕЙ)***

До недавнего времени недостаточное внимание уделялось вопросам влияния строительства и эксплуатации магистральных трубопроводов на состояние естественных ландшафтов и, в особенности, на набор и скорости экзогенных геоморфологических процессов. Еще в середине XX века развитие оврагов связывалось практически исключительно с сельскохозяйственным освоением территорий Черноземной и юга Нечерноземной зон [Косов и др., 1975]. Значительно меньшее внимание уделялось изучению причин возникновения овражной эрозии на урбанизированных территориях, при работах по добыче полезных ископаемых, прокладке коммуникаций и дорожном строительстве. В то же время именно при строительстве инженерных объектов необходимым становится учет возможности зарождения и активизации оврагов под влиянием повышенной антропогенной нагрузки и времени наступления опасной ситуации вследствие развития овражной эрозии.

В данной работе приводятся примеры исследований различной степени детальности участков проектируемых трубопроводов в Оренбургской и Волгоградской областях, направленных на оценку опасности развития линейной эрозии и сопутствующих ей экзогенных процессов, прогноза возможных негативных последствий активизации этих процессов как для самих трубопроводных систем, так и для состояния окружающей среды в целом.

Акцент в работе сделан на переходах трубопроводов через малые долины, в ландшафтно-климатических условиях Оренбургской и Волгоградской областей представленных, преимущественно, крупными балками и суходолами, не имеющими постоянного водотока. Сток воды в них возникает только периодически, во время снеготаяния или прохождения дождевых паводков. Такой гидрологический режим определяет доминирующую роль линейной эрозии (формирование и развитие донных, склоновых и береговых оврагов) в современной динамике этих форм флювиального рельефа. Однако необходимо учитывать, что совместно с линейной эрозией могут активизироваться массовое смещение склонового чехла, оползни, обвально-осыпные процессы, суффозия и др., негативное воздействие которых

* Выполнено при финансировании программы Президента РФ для поддержки ведущих научных школ (проект НШ-79.2012.5) и РФФИ (проекты 13-05-00162 и 13-05-00211).

на функционирование трубопровода и общее состояние окружающей среды также должно быть учтено.

Оренбургская область

Потребность в оценке современных эрозионно-аккумулятивных процессов выявилась при анализе состояния существующих (1 и 2) нитей трубопровода и проектировании дополнительной трассы (3-4 нити), соединяющих месторождения и Оренбургский газоконденсатный завод. Программа исследований предусматривала разработку рекомендаций в связи с возможными неблагоприятными последствиями развития на участке строительства линейных эрозионных форм. Реализация программы работ проводилась в летне-осенний период 2005 г. и состояла из трех этапов:

1. Полевое рекогносцировочное обследование трассы проектируемого трубопровода, в процессе которого визуально оценивалось современное состояние и выявлялись признаки активизации эрозионно-аккумулятивных процессов вдоль трассы газопровода. На выявленных наиболее активных участках проводились инструментальные измерения продольных и поперечных профилей овражных форм и отвершков балок.

2. На камеральном этапе анализировались топографические материалы (карты масштаба 1:25000), рассчитывались расходы и скорости потоков 1%, 2% и 5% обеспеченности, производящих эрозионную деятельность на водосборах верхних звеньев эрозионной сети, предельные габариты эрозионных форм, которые могут быть достигнуты в процессе развития, а также время возможного пересечения растущими оврагами трассы трубопровода.

3. Разработка рекомендаций по ограничению или ликвидации опасности развития линейных эрозионных форм вблизи трассы трубопровода.

Обследование показали, что трасса газопровода на изученном участке пересекает 25 эрозионноопасных малых водосборов, из которых 8 уже в настоящее время имеют четко выраженные в рельефе линейные врезы с растущими вершинами, находящимися в непосредственной близости от проектируемого трубопровода. Преобладающие породы на территории – опесчаненные и известковистые красноцветные глины с прослоями аргиллитов, мергелей и известняков (отложения татарского яруса верхней перми), перекрытые четвертичными покровными суглинками мощностью до 1-2 м. Малые долины, балки и овраги прорезают эту толщу на глубину до 60-80 м. В их днищах развиты четвертичные аллювиальные отложения, слагающие от одной до трех (в зависимости от размеров формы) террас.

Основная особенность пород, слагающих территорию – их малая эрозионная устойчивость, что выражается в высокой степени вертикального и горизонтального расчленения. Наличие полускальных прослоев не только не создает бронирующий эффект, но в значительной степени провоцирует развитие эрозионных процессов. Они маломощны, сильно раздроблены и залегают на глубине 20-30 м. Глины также имеют относительно невысокую

противоэрозионную стойкость. Их значительная опесчаненность обуславливает легкую размываемость. При врезании водных потоков в прослой более твердых пород образуются уступы и водобойные колодцы. В результате размыв таких прослоев происходит либо водными потоками больших расходов, способными транспортировать грубообломочный материал, либо в результате возникновения водобойного колодца и подмыва основания уступа с образованием нависающего карниза и его обрушением под действием силы тяжести. Дополнительный фактор размыва вдоль трассы трубопровода – нарушение естественного почвенно-растительного покрова.

Одним из водосборов с развивающимся донным врезом является балка Абиульган (водосборы № 4-5; здесь и далее – номера водосборов соответствуют указанным в табл. 1). Вершина растущего вреза глубиной 1-1,5 м находится на расстоянии 25 м от современной трассы трубопровода. Врез имеет ступенчатый продольный профиль с несколькими водобойными колодцами. Непосредственно в зоне трубопровода состояние перехода на момент наблюдений удовлетворительное. Однако выше трассы расположена земляная плотина, от которой по бортам долины намечаются свежие выносы грунта. Расположение плотины и ее современное состояние представляют значительную опасность, поскольку ее разрушение в случае интенсивного ливня или активного половодья может вызвать возникновение нового и активизацию роста существующего донного вреза.

Активная линейная эрозия наблюдается в балке Быков овраг (№ 22), водосбор которой привязан к р. Каргалке. Длина балочного водосбора – 5 км, средняя ширина – 2 км. Конус выноса балки площадью около 0,25 км² подрезается рекой с образованием уступов подмыва высотой 3-6 м. Днище балки залужено, местами заросло кустарником. Трубопровод пересекает вершину балки в месте перехода ее в пологую ложину. Наиболее эрозионно-опасный участок балки – ее привершинная часть, имеющая сравнительно неширокое днище, крутые борта и значительный продольный уклон. Натурные обследования участка трубопровода показали, что размывов подземных переходов труб не наблюдается. Отмечен активный регрессивный рост донного вреза непосредственно в коридоре трубопровода: прирост в 2005 г составил 5 м (рис. 1). Ниже основного вреза находится водобойный колодец со скальным днищем, лимитирующий дальнейшее углубление. Отмечены небольшие линейные размывы по колеям грунтовой дороги вдоль трассы, а также вдоль ниток газопровода на участках заглубления труб по бортам балки.

Интенсивные размывы также происходят выше и ниже перехода трубопровода в днище балки Сухой Дол на участке, к которому привязаны водосборы № 11 и 12. Возможно усиление размывов правого борта непосредственно в створе перехода, куда смещается динамическая ось потока. Труба подземного перехода на этом участке в настоящее время размыва на небольшую глубину (менее половины диаметра), протяженность оголенного участка составляет 4-5 м (рис. 2).



Рис. 1. Вершина донного вреза балки Быков овраг (водосбор № 22).



Рис. 2. Оголение действующего трубопровода в донном врезе балки Сухой Дол (устьевая часть водосборов № 11 и 12).

На водосборе № 14, расположенном между балками Сухой Лог и Елшанка, существующие 1 и 2 нити трубопровода пересекают развивающуюся промоину глубиной около 40 см. Ниже трубопровода промоина резко углубляется. Выше трубы расположена земляная плотина, к которой с правой стороны подходит донный врез, развитие которого представляет серьезную угрозу ее существованию. На водосборе № 15, кроме опасных подмывов берегов р. Елшанки и возможности образования эрозионных ступеней, уже зафиксированы линейные размывы непосредственно по линии газопровода. На водосборе балки Овраг Таймас (№ 25) развивается глубокий донный врез. В лощине выше створа трубопровода глубина врезов в балке достигает 7 м. Вершина донного оврага с эрозионным уступом высотой 8 м находится на расстоянии 250-300 м от места пересечения газопроводом лощины. По обоим бортам балки вдоль ниток трубопровода наблюдаются линейные размывы – промоины (рис. 3).



Рис. 3. Активно растущая промоина на левом борту балки Овраг Таймас ниже перехода действующих трубопроводов.

Гидрологические характеристики временных русловых потоков для последующего определения возможных предельных размеров эрозионных форм получены в соответствии с нормативным документом СП 33-101-2003 "Определение основных расчетных гидрологических характеристик", утвержденным ГОССТРОем РФ. Основной гидрологической характеристикой приняты максимальные расходы временных водных потоков расчетной вероятности превышения. По данным ГГИ, на исследуемой территории для водосборов площадью до 50 км² летние максимумы расхода (ливневые осадки) превосходят максимумы весеннего половодья (для расходов вероятностью превышения менее 3%). Расчеты потенциальных габаритных характеристик оврагов выполнены для расходов ливневого стока 1%, 2% и 5% вероятности превышения.

Определение габаритов эрозионных форм выполнялось по методике, разработанной в МГУ и основанной на географических закономерностях развития и распространения процессов линейной эрозии, а также на особенностях гидрологии и гидравлики склоновых потоков [Овражная эрозия, 1989; Зорина, 2003]. Метод позволяет определять предельные длины, ширину, глубину, площади и объемы оврагов, которые могут быть достигнуты в процессе их развития при реализации различных сценариев (в наиболее простом случае, для расходов воды разной вероятности превышения). Для получения необходимых данных о морфометрии водосборов, по которым проходят проектируемые и существующие нитки газопровода, использовались топографические карты масштабов 1:10000 и 1:25000, дополненные результатами полевого обследования.

В качестве входных параметров расчета для исследованных водосборных бассейнов приняты гидролого-морфометрические характеристики русла и склонов, дающие представление об особенностях склонового водосбора, концентрирующего склоновые потоки в единое русло с максимальными расходами в замыкающем створе, привязанном к более крупному звену эрозионной сети [Зорина, 2003; География..., 2006].

Гидроморфометрическая характеристика русла вычисляется по формуле:

$$\Phi_p = \frac{1000L}{m \cdot I^{0,33} \cdot F^{0,25} \cdot (\varphi \cdot H_{1\%})^{0,25}} \quad (1)$$

где L – протяженность русловой части склонового потока (выраженная в рельефе ложина, ложбина стока); m – коэффициент учитывающий шероховатость русла; F – площадь водосбора, км²; I – уклон по руслу, ‰; $H_{1\%}$ – суточный слой осадков вероятностью превышения $P=1\%$, определяемый по картам ГГИ; φ – коэффициент стока, величина которого принята осредненной равной 0,7 по данным многочисленных исследований.

Гидроморфометрическая характеристика склонов определяется по формуле:

$$\Phi_{скл} = \frac{(1000l)^{0,5}}{m_c \cdot I_{скл}^{0,25} \cdot (\varphi \cdot H_{1\%})^{0,5}} \quad (2)$$

где $I_{скл}$ – средний уклон склона, ‰; l – средняя длина склонов на водосборе, км; m_c – коэффициент, учитывающий шероховатость склона.

В зависимости от гидроморфометрической характеристики склона по данным СП 33-101-2003 определяется время склонового добегания. Исходя из величины гидроморфометрической характеристики русла и времени склонового добегания по таблицам определяется соотношение между модулем склонового стока и параметром φH , что позволяет получить величину модуля стока на водосборе с учетом комплекса гидроклиматических и почвенно-геоморфологических характеристик. Расчет расхода через замыкающий створ водосбора выполняется по зависимости $Q=qF$, где q – модуль стока, м³/с/км².

В соответствии с методикой определения габаритов эрозионных форм на заключительной стадии их развития под действием расходов разной вероятности превышения, предельно возможная длина эрозионной формы для заданных условий рассчитывается как функция глубины базиса эрозии и критического уклона, соответствующего условиям транспортирования потоком наносов со скоростями, равными размывающим ($V_{разм} = 1,4 V_{неразм}$).

Величина критического уклона определяется по формуле:

$$I_{кр} = A^{0,67} V_{разм}^{2,7} n^2 Q^{-0,67} \quad (3)$$

где: A – коэффициент формы русла; $V_{разм}$ – размывающая скорость, м/с; n – коэффициент шероховатости русла по Маннингу; Q – расход воды расчетного процента вероятности превышения, м³/с [Зорина, 2003; География., 2006].

Зависимость для определения предельной длины оврага на заключительной стадии развития имеет вид:

$$L = 0,2 \frac{H_0 Q^{0,67}}{V_{разм}^{2,7} n^2 A^{0,67}} \quad (4)$$

где H_0 – глубина базиса эрозии склонового водосбора, м.

Полученная по зависимости (4) длина предельно возможной эрозионной формы соответствует условиям её развития при выпуклом продольном профиле склонового водосбора. В том случае, если форма продольного профиля склонового водосбора близка к прямой, она может быть охарактеризована средним уклоном $I_{скл}$, практически постоянным и равным отношению глубины местного базиса эрозии к длине склона.

Если водосбор, на котором может по природным условиям начаться образование оврага, имеет в верховьях несколько подводящих ложин с вершинными врезами, расчет роста оврага и предельных габаритов производится на расходы потока со всей привершинной площади водосбора. При этом необходимо учитывать, что антропогенные воздействия на водосборе

могут создать условия концентрации стока в одной из вершин, которая будет активно развиваться, при постепенном отмирании остальных. К этому приводит, например, прокладка дюкеров под всякого рода коммуникациями, сосредоточение потока и его направленный сброс. Линейный прирост и врезание оврага обычно связаны с образованием и регрессивным смещением по продольному профилю эрозионных ступеней, которые могут сформироваться как в приустьевой, так и в средней и верхней частях оврага. Причиной их возникновения могут быть особенности структуры потока, выходы в днище оврага более плотных пород, загромождение русла овражного водотока оползневыми или обвально-осыпными телами и др. Активный период развития оврага обычно ограничивается формированием выработанного продольного профиля.

Поскольку основная задача – оценка опасности оврагообразования для газопровода, предельные габариты эрозионных форм определялись для створа пересечения с проектируемой трассой. Глубина эрозионной формы определялась как разность отметок современного продольного профиля и выработанного профиля для потенциально возможной максимальной длины. Ширина по днищу и бровке рассчитана, исходя из расходов в расчетном створе, типичных форм живого сечения потока в оврагах и балках и глубины эрозионной формы. В таблице 1 приводятся расчетные гидролого-геоморфологические характеристики всех исследованных водосборов. Нумерация в таблице (с 1 по 25) соответствует используемой в тексте статьи и в рисунках.

В качестве примера расчета для анализа возможной активизации линейной эрозии рассмотрены условия формирования эрозионного вреза на водосборе верховий балки Быков овраг (№ 22). Длина расчетного участка от водораздела до замыкающего створа – около 3,0 км, протяженность малой эрозионной формы – 1,8 км, площадь водосбора 3,15 км², глубина базиса эрозии – 47 м, уклон русловой части водосбора – 16‰, средний уклон склонов – 4,1‰, средняя длина склонов – 800 м. Расстояние от замыкающего створа до перехода трубопровода составляет около 1 км. При модуле стока с водосбора 1‰ вероятности превышения 7,8 м³/с/км² соответствующий расход воды в устьевом расчетном створе составляет 24,5 м³/с, критический уклон – 5‰, расход в створе перехода трубопровода – 17,2 м³/с; при 2‰ вероятности превышения, соответственно, 17,6 м³/с, 6‰ и 12,3 м³/с; при 5‰ – 9,8 м³/с, 9‰ и 6,9 м³/с.

Продольный профиль водосбора и тальвега балки, а также расчетные предельные продольные профили оврагов на водосборе № 22 для трех интервалов, которые могут развиваться в эрозионной форме, представлены на рис. 4. Уклон днища существующей эрозионной формы в устьевом створе рассматриваемого участка близок к 17‰, что делает реальной угрозой активного развития линейной эрозии, т.е. регрессивного продвижения вверх по балке вresa донного оврага. Глубина оврага в створе перехода при рас-

ходах 1% вероятности превышения составит 8-10 м, ширина по днищу – 11-13 м, ширина по бровкам до 50 м.

Таблица 1. Гидролого-морфометрические характеристики исследованных водосборов

№ водосбора	Длина водосбора, м	Глубина базиса эрозии, м	Площадь водосбора, км ²	Модуль стока 1% в.п., м ³ /с/км ²	Расчетные расходы воды в створе трубопровода, м ³ /с			Прогнозные параметры поперечного сечения эрозионного вреза в створе трубопровода при расчете на расходы воды 1% вероятности превышения		
					вероятность превышения			глубина, м	ширина по днищу, м	ширина по бровке, м
					1%	2%	5%			
1	3200	65	2,0	8,4	13,4	9,7	5,4	2-3	8-9	20
2	1700	25	0,85	11,9	8,1	5,8	3,2	2-3	6-7	17-20
3	2700	60	1,9	9,1	6,9	5,0	2,8	10-12	7	40-50
4	2300	70	1,2	9,1	7,9	5,5	3,1	10-12	7	40-50
5	3000	65	2,2	9,8	19,4	13,9	7,7	7	12	35
6	1900	80	1,0	11,2	2,2	1,7	0,9	15	5	60
7	2000	80	0,8	14,7	-	-	-	-	-	-
8	1900	80	1,26	14,7	-	-	-	-	-	-
9	3900	100	3,2	6,3	20,2	14,5	8,1	1-2	12	25
10	2700	87	1,5	14,7	22,0	15,9	8,8	5	15	40-50
11	1700	45	0,58	11,2	4,6	3,3	1,8	-	-	-
12	1300	30	0,42	14,7	-	-	-	-	-	-
13	2500	37	1,25	12,7	9,5	6,8	3,8	1-2	8	15
14	4000	80	4,0	10,0	36,0	26,1	14,4	6	15-20	40
15	800	16	0,27	14,7	-	-	-	-	-	-
16	2200	40	3,8	7,0	26,6	19,2	10,6	2	14	20
18	3300	50	2,7	8,4	18,2	13,0	7,3	6-8	11	35-40
19	2000	40	1,2	14,0	11,8	8,5	4,7	5	8-10	25
20	2500	60	2,2	8,8	17,3	12,5	6,9	10-13	11	55
21	3000	70	2,25	10,5	18,9	14,6	7,5	10-12	11-13	55
22	3000	47	3,15	7,8	17,2	12,3	6,9	8-10	11-13	50
23	1750	35	0,75	14,0	6,3	4,9	3,2	10	6	35-40
24	2000	63	1,0	11,9	11,9	8,6	4,8	10-15	8-10	50-55
25	6500	75	13,0	3,1	32,0	23,2	12,8	15	15	65

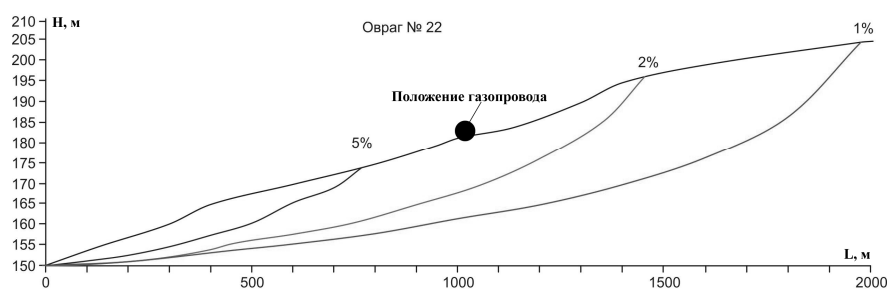


Рис. 4. Расчетные предельные продольные профили оврага на водосборе № 22 для расходов разной вероятности превышения (1%, 2% и 5%).

Анализ условий развития линейных эрозионных форм по единой методической схеме позволил выявить основные индикаторы опасности интенсификации линейной эрозии на изученных малых водосборах, к которым могут быть отнесены:

Наличие современных эрозионных врезов (оврагов, промоин) активизация которых может привести к аварийной ситуации на переходе газопровода. К таким водосборам относятся: вершинные водосборы балки Абиульган (№ 4, 5), водосборы на склонах к крупным лощинам в междуречье балки Абиульган и реки Елшанка (№ 9, 10), а также овраги Марьевский (№ 20 – рис. 5), Быков (№ 22 – рис. 4) и лощина на правом берегу р. Каргалки (№ 21).

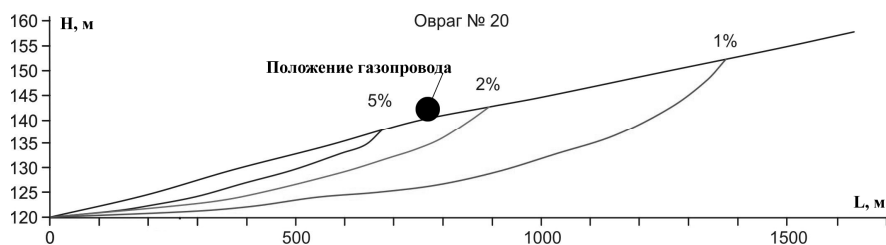


Рис. 5. Расчетные предельные продольные профили оврага на водосборе № 20 для расходов разной вероятности превышения (1%, 2% и 5%).

К этому же типу относится водосбор № 14; в ложине, дренирующей этот водосбор, отмечается донный врез большой протяженности. При обследовании трассы газопровода было зафиксировано также развитие вершинного размыва на водосборе вдоль автодороги.

Активизация эрозионного процесса в результате подмыва принимающим водотоком (рекой или донным врезом балки) берега в устьевой части малой эрозионной формы и образования эрозионной ступени. К водосборам, где развитие активных эрозионных врезов может начаться по указанному механизму, относятся склоновые водосборы на левом борту балки Сухой Дол (№ 11, 12), которая в настоящее время практически по всей длине имеет постоянный водоток в активном донном врезе глубиной 4-6 м. Аналогичная ситуация характерна для водосбора, устье которого привязано к р. Каргалке (№ 21), а также оврага Кайныгул (№ 23), устьевой участок которого находится на пойме р. Средней Каргалки. Подмытый рекой конус выноса оврага прорезается активным врезом глубиной до 3 м. Левый откос, представляющий опасность для газопровода, имеет в устьевой части эрозионной уступ высотой 7 м. Выше по течению р. Средней Каргалки на левом берегу расположен склоновый водосбор № 24 с линейными врезами глубиной 4-6 м (рис. 6).

Его устьевая часть также подрезается руслом реки, что обуславливает возможность дальнейшей активизации эрозионного процесса. Эрозионная ступень в устьевой части тальвега лощины достигает высоты 5 м, что способствует активизации эрозии. При этом переход трубопровода распо-

ложен не более чем в 500 м выше устьевой части лощины, дренирующей этот водосбор.

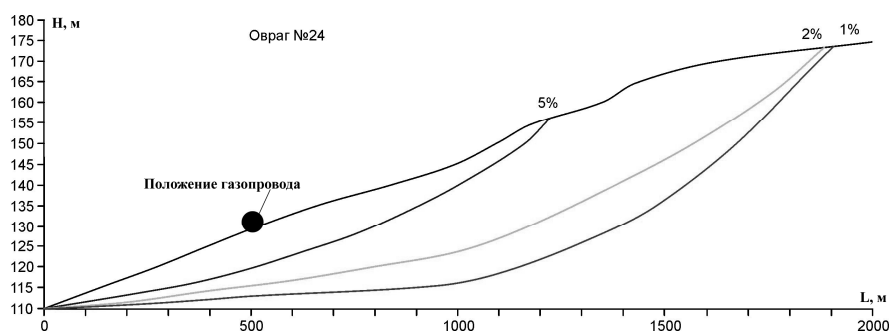


Рис. 6. Расчетные предельные продольные профили оврага на водосборе № 24 для расходов разной вероятности превышения (1%, 2% и 5%).

Причиной активизации линейной эрозии могут выступать гидро-технические сооружения в тальвегах малых эрозионных форм, особенно при нарушении их нормального функционирования. К ним относятся плотины, дюкеры, любые водосбросы, концентрирующие сток и направляющие его в лощинные понижения рельефа. Одним из таких объектов является плотина на водосборе левой привершинной лощины балки Абиульган. При этом даже при условии переноса перехода трассы в привершинную часть водосбора, выше плотины, опасность ее прорыва для состояния трубопровода сохраняется, поскольку разрушение плотины повлечет размыв ее нижнего бьефа с образованием эрозионной ступени, которая будет продвигаться регрессивно и подойдет к трассе трубопровода. На 650-700 м выше перехода трубопровода имеется плотина на крупном водосборе в лощине с устьевым створом, привязанным к оз. Октябрьскому (№ 14). Плотина возведена в створе, концентрирующем сток с трех крупных привершинных лощин. Особенно опасным делает этот участок наличие крупных промоин ниже плотины, одна из которых уже сейчас растет в обход плотины, создавая угрозу ее прорыва. На соседнем водосборе (№ 13), проходящем вдоль полотна железной дороги, опасность представляет состояние дюкера под ним, через который поток поступает в лощину, идущую вдоль насыпи, где уже сейчас наблюдается активный процесс размыва в тальвеге. Аналогичные процессы имеют место и на других водосборах, которые пересекаются трубопроводом и полотном железной дороги. Это связано с перераспределением стока вдоль насыпи и образованием эрозионных врезов, которые в дальнейшем могут оказать негативное влияние на состояние трубопровода.

Для оценки опасности развития эрозионного процесса во времени были приняты следующие показатели:

Максимальная скорость линейного роста эрозионной формы (м/год), рассчитываемая на основании эмпирически установленных соотношений между временем выработки максимальной длины оврага и временем достижения максимально возможного в данных условиях объема, а также распределения скоростей прироста длины оврага во времени [Овражная эрозия, 1989; Зорина, 2003; География..., 2006]. Максимальная скорость – это некоторый диапазон скоростей, характерных для наиболее активного линейного роста эрозионной формы на начальной стадии развития, составляющей, как правило, около 10% времени формирования ее полной длины [Зорина, 2003]. Фактические максимальные скорости линейного роста оврагов за отдельные годы могут варьировать в широких пределах и достигать 100-150 м/год [Бутаков и др., 2000; География..., 2006].

Средняя скорость линейного роста эрозионной формы (м/год) за все время ее активного развития. Определяется, исходя из максимально возможной расчетной длины и времени ее формирования.

Минимальная скорость линейного роста эрозионной формы (м/год). Как и максимальная, является расчетной величиной. Учитывать ее необходимо при рассмотрении периода длительного медленного роста эрозионной формы на поздних стадиях развития – в соответствии с распределением скоростей линейного роста во времени.

Время (годы), в течение которого вершина эрозионной формы подойдет к трассе трубопровода.

Время полного развития эрозионной формы (выработки максимально возможного объема) определяется по зависимости:

$$T = \frac{W}{AB\gamma} \quad (5)$$

где: W – объем эрозионной формы (м^3); γ – интенсивность выноса ($\text{м}^3/\text{год}$); A, B – эмпирические коэффициенты.

Продолжительность T^l периода активного линейного роста эрозионной формы определяется как $T^l = \lambda T$, где λ – эмпирический коэффициент. Предельная длина эрозионной формы в зависимости от скоростей ее роста на разных этапах развития может быть представлена как:

$$L = T_1^l V_1 + T_2^l V_2 + \dots + T_n^l V_n \quad (6)$$

где: $T_1^l, T_2^l, \dots, T_n^l$ – отрезки времени со средними скоростями линейного роста $V_1, V_2, \dots, V_n$. Каждое из слагаемых $T_n^l V_n$ соответствует приросту длины эрозионной формы за период, скорость линейного роста для которого принята осредненной и равной соответственно $V_1, V_2, \dots, V_n$.

При сопоставлении современных длин эрозионных врезов с максимально возможными расчетными величинами было выявлено, что потенциал линейного роста эрозионной сети исследуемой территории еще далеко не реализован. Скорости роста обследованных линейных эрозионных форм варьируют от максимальных, характерных для начальных стадий процесса,

до минимальных на завершающем этапе развития (табл. 2). Конкретные величины скоростей роста зависят не только от стадии развития, но и от гидрологических и морфометрических характеристик водосборов. С учетом стадии развития и особенностей водосбора получены приближенные оценки времени ΔT , в течение которого эрозионные формы на водосборах при отсутствии противоэрозионных мероприятий могут подойти вершинами к трубопроводу (табл. 2). По истечении этого времени будет происходить как дальнейший линейный рост эрозионных форм, так и их углубление и расширение до параметров, приведенных в табл. 1.

Значения отрезков времени ΔT были сопоставлены нами с ΔT^l , полученными другим расчетным методом – с применением критерия «оптимизма – пессимизма» Л. Гурвица [Орлова, 2005], в котором рассматриваются сочетания вариантов развития событий (табл. 2).

Таблица 2. Расчетные скорости роста эрозионных врезов и время достижения вершинами врезов створа перехода трубопровода для исследованных малых водосборов, оцененные по двум независимым методикам (см. описание в тексте)

№ водосбора	Скорость продвижения вершины эрозионного вреза (м/год)			Время достижения вершиной вреза створа перехода трубопровода (годы)	
	средняя	среднемаксимальная	среднеминимальная	ΔT по методике МГУ	ΔT^l по методике Л. Гурвица
1	13	53	1,5	45	50
2	8	30	0,8	20	20
3	8	33	0,8	60	64
4	2	10	0,2	100	132
5	3	13	0,3	45	65
6	2	8	0,2	220	225
7	2	8	0,2	300	140
8	4	15	0,4	220	94
9	10	38	0,9	5	5
10	4	15	0,4	5-10	10
13	14	55	1,4	50	40
14	13	53	1,3	-	-
15	3	11	0,3	40	32
16	25	100	3,0	2-3	4
18	7	27	0,7	30-40	38
19	7	29	0,7	25	34
20	3	12	0,3	120	70
21	4	14	0,4	35	50
22	5	20	0,5	15-20	14
23	2	6	0,1	100	140
24	1	5	0,1	-	-
25	12	50	1,2	15-20	14

¹⁾Эрозионные врезы № 11 и 12 в условиях современной морфометрии, без активизации эрозионных ступеней в устьевых створах, развиваться не будут.

²⁾На эрозионный врез №17 нет достаточного картографического обеспечения.

³⁾Эрозионные врезы № 14 и 24 уже прошли створ трубопровода.

Применение данного простейшего критерия прогноза считается возможным в тех случаях, когда трудно предположить вероятность отдельных сценариев развития процесса или реализация каждого является случайной. В данном случае за «пессимистический» принят вариант развития эрозионной формы при среднемаксимальной скорости линейного роста, за «оптимистический» – со среднеминимальной.

На большинстве водосборов отмечаются близкие величины временных отрезков ΔT и ΔT^I . Высокая сходимость подтверждает обоснованность выполненной оценки временного аспекта опасности развития линейной эрозии. Наибольшие отклонения от «абстрактной» оценки ΔT^I отмечаются для водосборов № 7, 8 и 20 (табл. 2), что объясняется развитием эрозионных врезов по тальвегам этих водосборов уже в настоящее время. Известно, что когда развитие линейной эрозии уже прошло пик активности, приходящийся на начальную стадию процесса, скорости линейного роста снижаются до средних и ниже средних. Таким образом, процесс займет значительно большее время, чем предполагает прогнозная оценка по Л. Гурвицу. Исходя из этого, можно утверждать, что на конкретных объектах – водосборах № 7, 8 и 20 – могут быть приняты оценки времени ΔT , полученные в соответствии с методикой МГУ, показывающие практическое отсутствие опасности размыва трубопровода.

Выполненный анализ результатов натурных обследований и количественная оценка пространственного и временного аспекта потенциала развития линейной эрозии для 25 малых водосборов вдоль трассы проектируемого газопровода в Оренбургской области позволили сформулировать следующие рекомендации:

1. Перенос трассы на водосборах отвершков балки Абиульган (№ 4, 5) выше на 200-250 м за плотину, через высотные отметки 283,5-283,7 м. Это благоприятно скажется и на состоянии водосбора соседней лощины (№ 10), вдоль которой проходит газопровод. Перенос трассы несколько севернее создаст более безопасные условия на водосборе балки Быков Овраг (№ 22), где ее современное положение практически совпадает с вершинным уступом активного донного вреза, и оврага Марьевский (№ 20), где она проходит на расстоянии около 500 м от вершины донного вреза, который потенциально может активизироваться при строительстве и достичь значительных размеров. Перенос трассы положительно скажется на состоянии перехода через р. Каргалку, где в настоящее время переход действующих трубопроводов пересекает донный врез в устье лощины, левый отвершек которого направлен к линии трассы проектируемого газопровода и, по расчетам, может также достичь значительных размеров в створе будущего перехода.

2. На всех участках водосборов, где потенциально можно ожидать активное развитие линейной эрозии, целесообразно планировать воздушные переходы газопровода с учетом потенциальных размеров поперечных сечений эрозионных врезов.

3. В том случае, когда вершина эрозионной формы имеет несколько подводящих понижений (лощин, ложбин), основное внимание следует уделить предотвращению концентрации стока воды. Для этого необходимо минимизировать антропогенное изменение морфометрии современных водосборов, не допускать перераспределения стока, приводящего к его концентрации (дорожные насыпи, посадки деревьев и кустарников без учета особенностей рельефа и т.п.), использовать доступные виды распылителей стока для целенаправленного рассредоточения поступающих в вершины малых эрозионных форм водных потоков.

4. Осуществлять постоянный мониторинг состояния плотин в процессе их эксплуатации. Особенно велика опасность прорыва плотин и дальнейшего развития эрозионных врезов вследствие некачественной постройки, нарушения условий эксплуатации, превышения фактическими расходами воды расчетных величин, что нередко имеет место при эксплуатации местных малых гидротехнических сооружений в верхних звеньях флювиальной сети.

Волгоградская область

Для центра и юге Приволжской возвышенности и севера Ергенинской возвышенности наиболее значительное по интенсивности и масштабам проявлений влияние на состояние трубопроводов оказывают эрозионно-аккумулятивные процессы, связанные с временными и постоянными водными потоками: делювиальный смыв (плоскостная и микроручейковая эрозия почв), линейная эрозия (образование и развитие промоин и оврагов) и русловые процессы. Определенную опасность для функционирования газопровода могут представлять оползневые процессы, развивающиеся на крутых бортах оврагов, балок и долин.

Делювиальный смыв на исследуемой территории развит повсеместно на сельскохозяйственных землях, а также на нераспахиваемых участках склонов, где естественная растительность по тем или иным причинам угнетена или полностью сведена. Наиболее активно этот процесс проявляется в период снеготаяния или во время ливневых дождей высокой интенсивности в летнее-осенний период даже при крутизне 1-2°, что связано с большими длинами склонов (до 1,5-2,0 км, местами более) и большими площадями склоновых водосборов. Наибольшая интенсивность смыва характерна для Приволжской возвышенности, где крутизна прибрежных частей водораздельных склонов достигает 5-6°. Особенно характерна интенсификация делювиального смыва для склонов, расчлененных сетью потяжин и ложбин, которые вызывают концентрацию поверхностного стока, увеличение расходов и усиление эродирующей способности склоновых потоков. Рыхлый материал с водоразделов и склонов переносится в балки, малые долины и тыловые швы днищ речных долин, где образует делювиальные накопления. Данный процесс широко развит на исследуемой территории в условиях интенсивного сельскохозяйственного освоения, однако, даже при интенсивном

проявлении, не представляет опасности для безаварийного функционирования газопровода в будущем. Потенциальную угрозу может представлять только интенсификация этого процесса на тех участках, где из-за наличия концентрирующих поверхностный сток потяжин и ложбин, возможно также развитие линейной эрозии и формирование оврагов (рис. 7). Проявления эрозии почв в результате выпадения ливневых дождей на незащищенную растительностью поверхность пашни были выявлены во время полевых обследований 2011 г. на всем протяжении исследуемого участка трассы газопровода.

Развитие линейной эрозии характерно для всей исследуемой территории. Наиболее интенсивное образование промоин и оврагов наблюдается на участках естественного или антропогенного нарушения естественной растительности на крутых бортах балок и долин (рис. 8, 9). Крупные овраги в верховьях овражно-балочных систем глубоко проникают в пределы водораздельных пространств в результате активного регрессивного роста. Особенно интенсивно этот процесс развивается на участках водоразделов на междуречьях рек Добринки, Малой Казанки и Большой Казанки, по правым бортам долин Иловли и Бердии, в междуречьях рек Ерика, Мышковы, Аксая Есауловского. Верхние активные части оврагов характеризуются V-образным или трапециевидным поперечным профилем с крутыми незадернованными бортами, глубина их достигает 10-15 м, на Приволжской возвышенности – до 20 м. Во многих случаях овраги объединяются в крупные разветвленные овражно-балочные системы с многочисленными активными отвершками. Длина основных «стволов» таких систем может достигать 2,5-3,0 км и более.



Рис. 7. Активные проявления делювиального смыва и линейных размывов по тальвегам потяжин на распаханном склоне, аккумуляция наносов в днище верховьев балки (Верховья балочной системы – правого притока р. Аксай Курмоярский).



Рис. 8. Активные линейные размывы на крутом подмываемом правом коренном борту балки Каменной в коридоре трассы действующего газопровода.

На переходе трассы действующего газопровода «Починки-Изобильное» через балку Каменную, в верховьях крупной балочной системы Сухой Каркагон (левый приток р. Грачи к востоку от с. Котлубань), крутые (от 8-10° на ненарушенных задернованных участках до 35-40° на оголенных крутых подмываемых донным врезом участках) борта, местами с выходами коренных пород (опоки, известняки, доломиты) поражены в разной степени активными промоинами, береговыми и склоновыми оврагами (рис. 8).

На переходе трассы действующего газопровода через балку Тарасовку (верховья крупной балочной системы – левого притока р. Бурлук у с. Крячки) на правом борту балки развиваются 2 активных оврага, отверстие одного из которых (глубина 2-3 м, ширина в бровках до 10 м, длина активной части – до 80 м) растет прямо в коридор действующего газопровода (рис. 9). Вдоль газопровода по колеям грунтовой дороги на обоих бортах балки наблюдаются активно растущие эрозионные борозды. У подножия правого борта по колеям – крупная промоина (глубина до 0,5-0,7 м, ширина до 1,5-3,0 м). Она перехватывает часть стока воды и наносов из оврагов, расположенных выше по склону. Ниже на днище балки формируется крупный песчаный конус выноса длиной до 50 м вдоль грунтовой дороги.



Рис. 9. А – переход действующего газопровода через балку Тарасовку с бровки левого борта; видны активные овраги и промоины на противоположном правом борту балки. Б – вершина одного из активных оврагов в 30 м к западу от технического коридора на правом борту балки.

Не менее широко распространено формирование локальных или протяженных донных врезов в днищах балок. Этому способствуют большие водосборные площади и высокий коэффициент стока в условиях значительной распаханности территории и угнетенного состояния растительности сухих степей на нераспаханных склонах в летний период. Непосредственно на трассе действующего газопровода «Починки-Изобильное» наиболее активные промоины и овраги на бортах балок и долин выявлены на переходах через ложбину в верховьях балки у дороги Медведица – Песковка, через

верховья овражно-балочной системы к юго-востоку от с. Медведица, балку Паруба, ложбину – левый приток р. Добринки южнее д. Морозово, балку Великую, левый отвершек оврага Поповского, балку Янкину, балку Березовую, балку Таловку, балку Каменную, балку Нагольную, балку Чилекова, балку Неклинскую, балку Копанскую, балку Осиновую, балку Голую, балку Коренную и ее отвершки.

Примером воздействия линейной эрозии на состояние трассы действующего газопровода «Починки-Изобильное» может служить его переход через эрозионно-активные верховья крупной овражно-балочной системы – левого притока р. Медведицы к юго-востоку от с. Медведицы. Левый верхний отвершек характеризуется симметричным V-образным поперечным профилем, узким (первые метры) днищем и бортами высотой до 12-15 м с естественной крутизной до 15-20°. В днище оврага – активный врез глубиной 2-3 м и шириной до 3-4 м с размываемыми незадернованными бортами и отмосткой из грубообломочного материала (щебень и галька песчаников) в днище (рис. 10 А). Несмотря на выполненные мероприятия по выполаживанию бортов оврага в коридоре и противозерозионной защите (георешетки с щебневой засыпкой), по бортам вреза в искусственных выемках наблюдаются линейные размывы, вызывающие оголение и провисание георешеток, а также оплывание грунта (рис. 10 Б). Таким образом, активные проявления линейной эрозии в днищах овражно-балочных систем, помимо прямого воздействия в результате донных размывов, могут активизировать другие опасные процессы на бортах – плоскостной и ручейковый смыл, линейную эрозию, оплывание и оползание грунта, что полностью дестабилизирует ситуацию в коридоре газопровода.



Рис. 10. А – донный врез на переходе газопровода через овраг у с. Медведицы; в центральной части снимка видны деформации георешетки в результате оплывания грунта. Б – размыв и проседание георешетки в результате линейной эрозии по выемке в нижней части правого борта оврага.

Нередко интенсивное развитие линейной эрозии в днищах овражно-балочных систем может быть спровоцировано прорывами земляных плотин

прудов, которые многочисленны на исследуемой территории и, зачастую, не оборудованы аварийными водосбросами и противоэрозионными сооружениями. При прорывах крупных прудов из-за больших расходов воды, проходящих в течение короткого промежутка времени, могут образовываться донные врезы, морфометрические параметры которых существенно превышают нормальные для балок исследуемой территории. Например, в результате прорыва плотины в днище главного левого отвершка крупной системы оврага Поповского (в 3200 м к ЮЮЗ от пересечения действующего газопровода «Починки-Изобильное» с автодорогой Котово – Лапшинская) сформировался овраг длиной около 200 м, максимальной глубиной до 8-10 м и шириной по бровкам до 20-25 м, с крутыми размываемыми бортами и активным вершинным врезом, регрессивно продвигающимся в теле прудового заполнения (рис. 11). У подножия бортов вреза повсеместно наблюдаются свежие блоки обвалившегося грунта. Активный отвершек также развивается по левому борту балки. В настоящее время вершина вреза находится всего в 70 м ниже перехода газопровода через верховья балки и, таким образом, создает реальную угрозу вскрытия трубопровода в результате донного размыва. Такие ситуации требуют регулярных наблюдений и проведения дополнительных противоэрозионных мероприятий.

Русловые процессы, главным образом – размывы берегов и дна русел, относятся к числу наиболее опасных природных явлений, учитываемых при выборе местоположения перехода трубопроводов через реки [Беркович, 2005; Алексеевский и др., 2008]. На исследуемой территории протекают реки степного типа с хорошо разработанными древними долинами и резко выраженной сезонной неравномерностью стока. Многие реки в сухой летний период пересыхают, их русла лишаются постоянного стока и разбиваются на отдельные бочаги, приуроченные к выходам в русло грунтовых вод. Размывы берегов наблюдаются только в периоды весенних половодий и кратковременных дождевых паводков, когда расходы воды могут возрасти в десятки раз. В долине р. Иловли современной боковой эрозии подвержено до 35% протяженности береговой линии, р. Бурлука – около 50% (рис. 12), р. Бердии – до 60%. Однако, интенсивность размывов относительно невысокая, в большинстве случаев не превышает 0,5-1 м/год. Заметная активизация размывов берегов наблюдалась в период интенсификации сельского хозяйства территории и введения оросительных мелиоративных систем. В ряде долин рек на подмываемых крутых бортах происходит также активизация линейной эрозии, оползней, осыпей, отседания склонов (рис. 13).

Однако большинство рек и балок характеризуются низкими темпами размывов берегов и практическим отсутствием признаков современных вертикальных русловых деформаций. Так, по трассе действующего газопровода бетонированные конструкции, защищающие борта и дно русла от размыва установлены только на переходе через русло р. Аксай Курмоярский.

Даже в условиях нарушения естественного рельефа и растительного покрова днищ долин в ходе строительства газопровода активизация этих

процессов имеет кратковременный характер (непосредственно в период строительства), особенно при условии выполнения своевременно и в полном объеме предусмотренных проектом рекультивационных и противоэрозионных мероприятий. Тем не менее, на ряде переходов действующего газопровода через малые реки отмечена недостаточная пропускная способность водопропусков вдольтрассового проезда. В этой ситуации возможно развитие локальных размывов дна и берегов на переходах.

В целом по всему исследуемому участку трассы проектируемого газопровода в Волгоградской области активные проявления русловых процессов (размывы дна и берегов русел рек), линейной эрозии (донные врезы балок, склоновые и береговые овраги, свежие промоины) и оползневых процессов встречаются локализовано и в настоящее время представляют в основном потенциальную опасность как для безаварийного функционирования газопровода в будущем, так и для состояния окружающей среды на прилегающей территории.



Рис. 11. Врез в прорыве плотины в верховьях оврага Поповского. А – вид вверх по оврагу в сторону пруда; Б – вид вниз по оврагу.



Рис. 12. Размыв вогнутого берега излучины в верхней части технического коридора действующего газопровода «Починки-Изобильное» на переходе через долину р. Бурлук.



Рис. 13. Активно растущий отвершек в вершине оврага на крутом подмываемом правом борту долины р. Аксай Курмоярский. Видны оголенные отвесные борта оврага и отседающий блок у его левого борта.

Своевременное и в полном объеме выполнение заложенных в проекте рекультивационных и противоэрозионных мероприятий обеспечит минимизацию эффектов активизации этих процессов на этапе строительства газопровода и стабилизацию состояния окружающей среды на этапе его эксплуатации.

Заключение

На переходах трубопроводов через малые долины необходима организация мероприятий по контролю или предотвращению интенсивного развития: 1) вертикальных и горизонтальных русловых деформаций в реках; 2) плоскостной и линейной эрозии на склонах долин и в днищах малых долин без постоянного водотока; 3) оползней, оплывин, блокового отседания и т.п. на берегах рек и бортах.

Строительство и эксплуатация магистральных трубопроводов в определенных условиях приводит к резкому увеличению скоростей и масштабов проявления эрозионных и русловых процессов в коридорах магистральных трубопроводов на пересечениях с речными долинами и суходольно-балочной сетью.

Проекты строительства магистральных трубопроводов должны предусматривать программы мониторинга эрозионных и русловых процессов на переходах трубопроводов через речные долины на стадиях их строительства и эксплуатации, что позволит оценить темпы антропогенно ускоренных процессов и объемы материала, перемещаемого этими процессами. Основной целью программ мониторинга является выявление участков, где необходима разработка и осуществление дополнительных строительных или рекультивационных работ для предотвращения или контроля последствий интенсивного развития эрозионных и русловых процессов как для безопасной эксплуатации магистральных трубопроводов, так и для состояния окружающей среды.

ЛИТЕРАТУРА

Алексеевский Н.И., Беркович К.М., Иванов В.В., Чалый А.П. К учету опасных природных процессов на переходах трубопроводов через реки // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 16. М.: Изд-во МГУ. 2008.

Беркович К.М. Переформирования русла на подводных переходах магистральных трубопроводов через реки и мониторинг русловых процессов // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 15. М.: Изд-во МГУ. 2005.

Бутаков Г.П., Зорина Е.Ф., Никольская И.И., Рысин И.И., Серебренникова И.А., Юсупова В.В. Тенденции развития овражной эрозии в Европейской России // Эрозионные и русловые процессы. Вып. 3. М.: Изд-во МГУ. 2000.

География овражной эрозии. М.: Изд-во МГУ. 2006 г.

Зорина Е.Ф. Овражная эрозия: закономерности и потенциал развития. М.: ГЕОС. 2003. 168 с.

Косов Б.Ф., Зорина Е.Ф., Прохорова С.Д. Опыт учета роли антропогенного фактора в развитии овражной сети в степной и лесостепной зонах Европейской территории СССР // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1975. № 6.

Овражная эрозия М.: Изд-во МГУ. 1989.

Орлова Е.Р. Оценка инвестиций. М.: Изд. Межд. акад. оценки и консалтинга. 2005.