

## РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ ПРИРОДЫ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ

УДК 551.4; 551.340; 631.459.23

DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2020-2(109-118)

А.Ю. СИДОРЧУК

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия, Fluvial05@gmail.com

### ОЦЕНКА ОБРАЖНОГО ПОТЕНЦИАЛА ТЕРРИТОРИИ НА ПРИМЕРЕ ЦЕНТРАЛЬНОГО ЯМАЛА

*Выявлено, что в криолитозоне на севере Западной Сибири на п-ове Ямал ярко выражены современные процессы овражной эрозии и термоэрозии, в том числе на территориях нового освоения. В этих условиях знание овражного потенциала способствует рациональному размещению сооружений и объектов инфраструктуры на территориях нового освоения и предотвращению их повреждения и разрушения возникающими оврагами. Проведен расчет овражного потенциала для одного из балочных водосборов в области Бованенковского газоконденсатного месторождения. Использована динамическая модель овражной эрозии и термоэрозии GULTEM, которая описывает основные процессы образования оврагов в криолитозоне и позволяет дать обоснованную оценку овражного потенциала. Расчеты выполнены на основе цифровой модели рельефа ArcticDEM, метеоданные получены с ближайшего узла сетки реанализа ERA-Interim, расходы воды рассчитаны по гидрологической модели, калиброванной по данным наблюдений на этом водосборе. Оценки овражного потенциала даны для разных значений критической скорости начала размыва верхнего слоя почвогрунтов с растительностью. Проведено сравнение рассчитанного овражного потенциала с эрозионным рельефом на водосборе. Установлено, что овражный потенциал, рассчитанный для сильно нарушенного растительного покрова, соответствует эрозионной сети на водосборе, которая сложилась более чем за 30 лет его освоения. Сделан вывод, что овражный потенциал этого водосбора в основном выработан и дальнейшее удлинение овражной сети маловероятно. Поэтому инфраструктура Бованенковского газоконденсатного месторождения, преимущественно расположенная на плоской водораздельной поверхности, подвержена только ручейковой эрозии, последствия которой легко устраняются.*

*Ключевые слова: криолитозона, п-ов Ямал, месторождения нефти и газа, динамическая модель образования оврага, степень нарушения растительного покрова, критическая скорость потока для начала эрозии.*

А.Yu. SIDORCHUK

Lomonosov Moscow State University,  
119991, Moscow, Leninskie gory, 1, Russia, Fluvial05@gmail.com

### ASSESSING THE GULLY POTENTIAL OF A TERRITORY (A CASE STUDY OF CENTRAL YAMAL)

*Modern processes of gully erosion and thermoerosion are clearly pronounced in the permafrost zone in the north of Western Siberia, on the Yamal Peninsula, including in the territories of new development. Under these conditions, knowledge of the gully potential is necessary for the rational siting of buildings and infrastructure in the areas of new development in order to avoid their damage and destruction by newly formed gullies. The gully erosion potential was calculated for one of the valley catchments in the area of the Bovanenkovo gas condensate field. The dynamic model of gully erosion and thermoerosion (GULTEM) was used, which describes the main gullying processes in the permafrost zone and permits a reasonable assessment of the gully erosion potential. The calculations were done in terms of the ArcticDEM digital elevation model, climate data were obtained from the nearest node of the ERA-Interim reanalysis grid, and water discharges were calculated using the hydrological model calibrated with observational data on this catchment. The gully erosion potential was estimated for different values of the critical rate of erosion initiation for the upper soil layer with vegetation. The calculated gully erosion potential was compared with the erosion*

*relief on the catchment. It has been established that the gully potential calculated for severely disturbed vegetation cover corresponds to the erosion network in the catchment area formed over more than 30 years of its development. It is concluded that the erosion potential of this catchment is mainly developed, with low probability of a further lengthening of the gully network. Therefore, only rill erosion can damage the infrastructure of the Bovanenkovo gas condensate field, mainly located on a flat watershed surface, the consequences of which are easily eliminated.*

Keywords: *permafrost zone, Yamal Peninsula, oil and gas fields, dynamic model of gully formation, degree of disturbance of vegetation cover, critical velocity of flow for erosion initiation.*

## ВВЕДЕНИЕ

Современная перигляциальная область в Российской Арктике подвержена овражной эрозии и характеризуется густой овражно-балочной сетью. Наиболее активно эти процессы выражены на севере Западной Сибири, на полуостровах Ямал, Тазовский, Гыданский. Здесь густота балок и оврагов со связанными с ними ложбинами на склонах достигает 2–2,5 км/км<sup>2</sup> при довольно скромном вертикальном расчленении рельефа — в среднем до 25–50 м. Главная причина этого — криогенное состояние территории и обилие льдов разного типа в мерзлых грунтовых толщах. Криогенные процессы формируют сеть мерзлотных трещин, которые представляют собой каналы стока поверхностных вод и в условиях высокой льдистости и разреженной растительности подвержены овражной термоэрозии. Сезонное таяние грунтовых льдов приводит к неустойчивости активного поверхностного слоя грунта и к формированию многочисленных сплывов и оползней. На таких участках происходят повреждение, разрыв и уничтожение растительного покрова и формирование областей оголенного мерзлого грунта, которые легко осваиваются линейной термоэрозией и эрозией, и где за сравнительно небольшое время образуются крупные овраги. При снеготаянии и дождях в условиях малых потерь на испарение и инфильтрацию осадки практически целиком преобразуются в поверхностный сток, так что даже небольшой дождь создает условия для значительной эрозии. Все эти явления усиливаются в ходе антропогенного освоения криолитозоны, повреждения растительного покрова, строительства поселков и линейных объектов, увеличения вероятности скопления снега и появления источников теплой воды. В этих условиях знание овражного потенциала может способствовать рациональному размещению сооружений и объектов инфраструктуры на территориях нового освоения во избежание их повреждения и разрушения возникающими оврагами.

## МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОВРАЖНОГО ПОТЕНЦИАЛА

**Статические модели овражной эрозии.** Потенциал развития овражной сети — максимально возможные длины оврагов в данных условиях — обычно оценивался для сельскохозяйственных земель. Е.Ф. Зорина [1] так сформулировала эту задачу: рассчитать форму выработанного продольного профиля оврага и найти ту точку, где эта кривая пересекает линию склона водосбора; расстояние от устья оврага до этой точки и будет максимально возможной длиной оврага. Также Е.Ф. Зорина предложила формулу для расчета этой длины [2], сделав некоторые предположения о конфигурации водосбора:

$$L = 0,28 \left( \frac{d}{W} \right)^{0,67} \frac{HQ^{0,67}}{n^2 U_{cr}^{2,67}}, \quad (1)$$

где  $H$  — глубина базиса эрозии,  $Q$  — формирующий расход воды,  $n$  — коэффициент шероховатости по Маннингу,  $U_{cr}$  — критическая неразмывающая скорость,  $d$ ,  $W$  — глубина и ширина потока в овраге соответственно.

Этот подход был распространен нами [3] на овражные водосборы любой формы; сделаны также предложения по оценке величин формирующих расходов воды. Разработанная модель расчета выработанного продольного профиля оврага названа статической, так как она относится к такой стадии развития оврага, когда дно уже не размывается. Это происходит в условиях равенства величин скоростей потока  $U$  в овраге и критических неразмывающих скоростей для грунтов, слагающих днище ( $U_{cr}$ ). Статическая модель учитывает изменчивость размываемости прорезаемых грунтов, как по глубине, так и по длине оврага.

Другой вариант статической модели — поиск области, где расположена вершина оврага по критическим уклонам  $S$  и площади водосбора  $A$ :

$$S = aA^{-b}. \quad (2)$$

Этот подход был предложен Паттоном и Шаммом [4], его теоретическое обоснование было неоднократно рассмотрено [5–8]. В данных работах показано, что формула (2) — эмпирический аналог формулы для критического касательного напряжения в потоке  $\tau$ , при котором начинается эрозия:

$$\tau = g\rho dS. \quad (3)$$

Если выразить глубину потока  $d$  через формирующий расход воды  $Q$ , а затем и площадь водосбора  $A$  [7], то формула (3) записывается как

$$\tau = g\rho k_1 Q^r S = g\rho k_1 k_2^r A^f S, \quad (4)$$

что после объединения констант и эмпирических коэффициентов может быть представлено в виде формулы (2). Формула (3) имеет ясный физический смысл. В формуле (4) уже присутствуют эмпирические коэффициенты  $k_1, k_2, r, f$ , которые существенно различаются для разных объектов, но все еще неясно их происхождение. К сожалению, в большинстве работ применяется эмпирическая формула (2) с большим разнообразием величин коэффициентов  $a$  и  $b$ , физический смысл которых уже не анализируется [9]. Это делает формулу (2) мало пригодной для практического использования в оценке потенциала овражной эрозии. Но даже в варианте (4) в формулу входит один формирующий расход  $Q$ , величина которого остается неопределенной, а неравномерность стока вообще не учитывается. Этот же недостаток присущ формуле (1). В статической модели [3] влияние неравномерности стока оценивается с помощью схемы Н.И. Маккавеева [10] для расчета руслоформирующего расхода воды, что является некой параметризацией сложного процесса с неизбежными потерями точности.

**Динамическая модель овражной эрозии и термоэрозии.** Недостатков различных вариантов статической модели лишена динамическая модель овражной эрозии [11] и ее модификация для условий криолитозоны [12], где расчет интенсивности эрозии происходит в «реальном» времени на всей длине линии тока на овражном водосборе при заданной последовательности расчетных расходов воды с учетом литологии прорезаемой толщи, включая верхний слой почвогрунтов с растительностью. Динамическая модель позволяет проследить все стадии развития оврага, начиная с эрозионной промоины на склоне и кончая зрелой формой с выработанным продольным профилем. При этом максимально возможная длина определяется уже на начальных этапах расчетов, которые нет необходимости доводить до стадии выработанного продольного профиля. Как показывают полевые наблюдения, в том числе в криолитозоне [13], данные экспериментов [14] и расчеты с помощью динамической модели [15], около 95 % максимально возможной длины оврага вырабатывается в первые 5 % продолжительности его жизни. На мерзлых грунтах этот процесс происходит быстро, подчас катастрофически [16, 17], и практически полная длина оврага (частично в виде эрозионной промоины) оформляется уже в первые 4–5 лет его развития.

Модель GULTEM в различных модификациях уже была описана, поэтому остановимся только на наиболее существенных ее элементах, а детали можно найти в [12]. Модель двумерная, рассчитываются изменения отметок дна и ширины оврага во времени по длине линии тока. Линии тока выделяются на всем водосборе оврага и покрывают его или полностью, или значительную часть. Так что расчет на их совокупности дает трехмерную картину изменения во времени отметок поверхности водосбора.

Модель полуэмпирическая: базируется на теоретических предпосылках, но широко используются эмпирические формулы. Описываются четыре главных процесса: врезание потока в мерзлый грунт (термоэрозия); врезание потока в талый грунт (эрозия); расширение днища оврага в ходе врезания; оползание талых грунтов с бортов оврага и формирование поперечного профиля.

Термоэрозия записывается как линейная зависимость скорости понижения отметок поверхности мерзлого грунта  $Z$  от температуры воды  $T$ :

$$\left(\frac{dz}{dt}\right)_{te} = k_{te} T, \quad (5)$$

где  $t$  — время,  $k_{te}$  — коэффициент термоэрозии, который зависит от свойств мерзлого грунта. Фактически эта формула описывает скорость протаивания верхнего слоя мерзлого грунта, который тут же смывается потоком.

Эрозия записывается как линейная зависимость скорости понижения отметок поверхности талого грунта  $Z$  от произведения удельного расхода воды  $q$  на уклон свободной поверхности потока  $S$ :

$$\left(\frac{dz}{dt}\right)_e = k_e q S. \quad (6)$$

Для периода снеготаяния применяется правило: если скорость термоэрозии (протаивания) по формуле (5) больше скорости эрозии по формуле (6), расчет ведется по формуле (6), т. е. происходит эрозия талого грунта; в противном случае, когда поверхность талого грунта все время обнажается, выполняется расчет по формуле (5). Боковая эрозия считается незначительной, образуется глубокий врез с вертикальными стенками с шириной, равной ширине потока. После периода снеготаяния этот прямоугольный врез трансформируется в трапециевидный за счет схода оплывин и оползней с бортов оврага.

Для периода летних дождей расчет производится по формуле эрозии (6), так как грунт в овраге в основном уже талый. При этом происходит боковая эрозия в его днище, ширина  $W_b$  увеличивается пропорционально величине врезания:

$$\frac{dW_b}{dt} = k_b \frac{dz}{dt}. \quad (7)$$

После каждого эпизода дождя форма трапециевидного поперечного профиля и глубина оврага  $D_t$  пересчитываются с учетом увеличения его объема  $V_0$ :

$$D_t = \left( \sqrt{W_b^2 + \frac{4V_0}{\tan(\varphi)}} - W_b \right) \frac{\tan(\varphi)}{2}, \quad (8)$$

где  $\varphi$  — наклон бортов оврага, принимаемый равным углу естественного откоса для данных грунтов.

Для тех участков, где поверхностный слой почвогрунтов с растительностью не уничтожен или не промыт и под ним располагаются мерзлые грунты, во все периоды применяется правило, принятое для периода снеготаяния.

В формулы (5)–(7) не входит в явном виде критическая скорость потока, при которой начинается размыв грунта того или иного состава. В расчетах применяется правило, что при скоростях потока меньше критической эрозия и термоэрозия равны нулю. Исходя из формулы Шези, формулы для расчета расхода и эмпирической связи ширины потока и расхода воды, скорость потока рассчитывается следующим образом:

$$U = \sqrt[3]{\frac{KQ^{4p/3}S}{n^2}}. \quad (9)$$

По измерениям в оврагах Центрального Ямала средние значения коэффициентов равны:  $K = 0,46$ ,  $p = 0,49$  и  $n = 0,06$ .

Интенсивность эрозии сильно зависит от степени неравномерности скоростей в потоке, в частности, ускорения потока на ступенях продольного профиля, обычно многочисленных по длине оврага. Из них наиболее выражена ступень в его вершине, которая часто достигает нескольких метров в высоту. На этих ступенях формируется бурное течение, число Фруда  $Fr = \frac{U_c}{\sqrt{gd}}$  близко к 1, и скорость на ступени рассчитывается по формуле для широкого водослива:

$$U_c = m\sqrt{2gH_0}; \quad H_0 = d + \frac{U^2}{2g} = \frac{Q}{UW} + \frac{U^2}{2g} = 0,29 \frac{Q^p}{U} + \frac{U^2}{2g}, \quad (10)$$

где  $m$  — коэффициент расхода на водосливе, изменяющийся в пределах 0,4–0,5; удельный расход воды  $UW$  выражен по эмпирической формуле через полный расход подходящего к краю ступени потока.

Необходимые метеорологические данные, а также информация о температуре воздуха и осадках получены на ближайших метеостанциях. Так как в Арктике их сеть редкая, приходится прибегать к данным реанализа по равномерной сетке (например, в версии реанализа ERA-Interim шаг сетки составляет  $0,75 \times 0,75^\circ$ ). Расходы воды рассчитываются по гидрологической модели на основании этих метеоданных. Для территории п-ова Ямал в разное время были реализованы и калиброваны модели Института водных проблем РАН [18] и Государственного гидрологического института [19, 20]. На базе этих двух моделей сформирована синтетическая гидрологическая модель, которая также была откалибрована по данным наблюдений на Ямале [21]. Необходимые входные данные для расчетов по формулам (6)–(10) получены при оценке согласно полученной модели стока во время снеготаяния и дождей.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате исследования был выведен алгоритм расчета потенциала овражной эрозии. Расчеты проводятся в следующей последовательности.

В первую очередь строятся растровая цифровая модель рельефа (ЦМР) для исследуемого овражного водосбора (водосборов), цифровые модели поверхностей раздела всех литологических разностей, прорезаемых оврагами, включая подошву почвенно-грунтового слоя с растительностью. В данном исследовании использованы ЦМР ArcticDEM [22] и наблюдения за свойствами грунтов 1990–1997 гг.

Далее по ЦМР строится поле направлений стока по наибольшему уклону к ближайшему соседу и поле площадей водосборов, опирающихся на данный пиксель, а также система линий тока разного порядка. Эти процедуры обычно реализованы в коммерческих и открытых ГИС, в данном исследовании использована открытая ГИС QGIS [23] с инструментами ГИС SAGA.

Следующим шагом является построение по полю направлений стока линий тока, берущих начало на всех некраевых пикселях (или на пикселях с некоторой начальной характеристикой, например, минимальной площадью водосбора) и заканчивающихся на краевых. Эта процедура имеется далеко не во всех ГИС, что может потребовать составления специальной программы. Обычно требуется также фильтрация получившихся линий тока по длине, по принадлежности к данной овражной системе и т. п.

Для каждого овражного водосбора выделяется система растровых линий тока, каждая из которых проходит от своего истока до устья оврага, и для каждого пикселя которой имеется информация о его горизонтальных координатах, вертикальных отметках свободной поверхности и поверхностях раздела всех литологических разностей, а также площадях водосбора, опирающихся на данный пиксель.

Для ближайшей точки сетки реанализа снимаются необходимые метеорологические характеристики: высота и плотность снежного покрова в начале снеготаяния, осадки теплого периода, температура воздуха. По этим данным по срокам по гидрологической модели рассчитывается слой стока воды в периоды снеготаяния и летних дождей.

Далее для каждой линии тока по модели GULTEM [12] рассчитывается изменение вертикальных отметок поверхности на овражном водосборе за период не менее 30 лет при различных значениях критической скорости начала размыва. Детальное описание применяемых эмпирических формул, расчетных цифровых схем и приемов можно найти в публикации [12].

Финальный шаг алгоритма включает в себя назначение опасной величины вертикального размыва овражного водосбора. В качестве таковой целесообразно принять мощность верхнего слоя почвогрунтов с растительностью. Часть водосбора, на которой размыв больше опасного при заданной критической скорости, выделяется как область, где необходимы мероприятия по снижению или устранению овражной эрозии.

Для примера расчета овражного потенциала мы исследовали балочный водосбор на п-ове Ямал. Приведенный выше алгоритм был реализован для водосбора крупной балки на останце третьей морской террасы, сложенной суглинками. На нем расположен один из объектов освоения Бованенковского газоконденсатного месторождения — пос. ПББ (передвижная база бурения). Расчеты велись при четырех значениях критической скорости начала размыва  $U_{cr}$ : 0,2; 0,3; 0,4 и 0,5 м/с для верхнего слоя почвогрунтов с растительностью и 0,12 м/с для основной толщи грунта. Значения коэффициентов в формулах (6)–(10) были получены путем калибровки модели GULTEM на основе материалов наблюдений за оврагами на участке другого объекта — КЭХ (комплексное электрохозяйство) [12].

При  $U_{cr} = 0,5$  м/с для верхнего слоя грунта (рис. 1) рассчитанный овражный потенциал (т. е. длины линейных эрозионных форм с глубиной размыва более 10 см, которые сформировались за 30 лет) практически совпадает с основной балкой, которая образовалась в натуральных условиях до сооружения поселка ПББ. Такая критическая скорость характерна для почвогрунтов с плотностью подземной биомассы (тонких корешков растений) 2–3 г/100 см<sup>3</sup> [24, 25]. Это в целом соответствует ненарушенному покрову в тундре с кустарниковой ивняковой растительностью.

Овражный потенциал при  $U_{cr} = 0,4$  м/с для верхнего слоя грунта в основном все еще соответствует натурной эрозионной сети. Но при столь небольшом уменьшении эрозионной устойчивости грунта (на 0,2–0,3 г/100 см<sup>3</sup>) возник потенциальный овраг Антропогенный (см. рис. 1), которого не было в естественных условиях формирования эрозионного рельефа (рис. 2). Этот овраг протягивается от русла основной балки почти до края площадки пос. ПББ.

Овражный потенциал при  $U_{cr} = 0,3$  и 0,2 м/с для верхнего слоя грунта уже существенно продлевает натурную эрозионную сеть (см. рис. 1). Такие критические скорости соответствуют сильно нарушенному растительному покрову и верхнему слою почвогрунтов (до содержания растительных остатков менее 1–2 г/100 см<sup>3</sup>), поэтому потенциал овражной эрозии близок к максимальному.

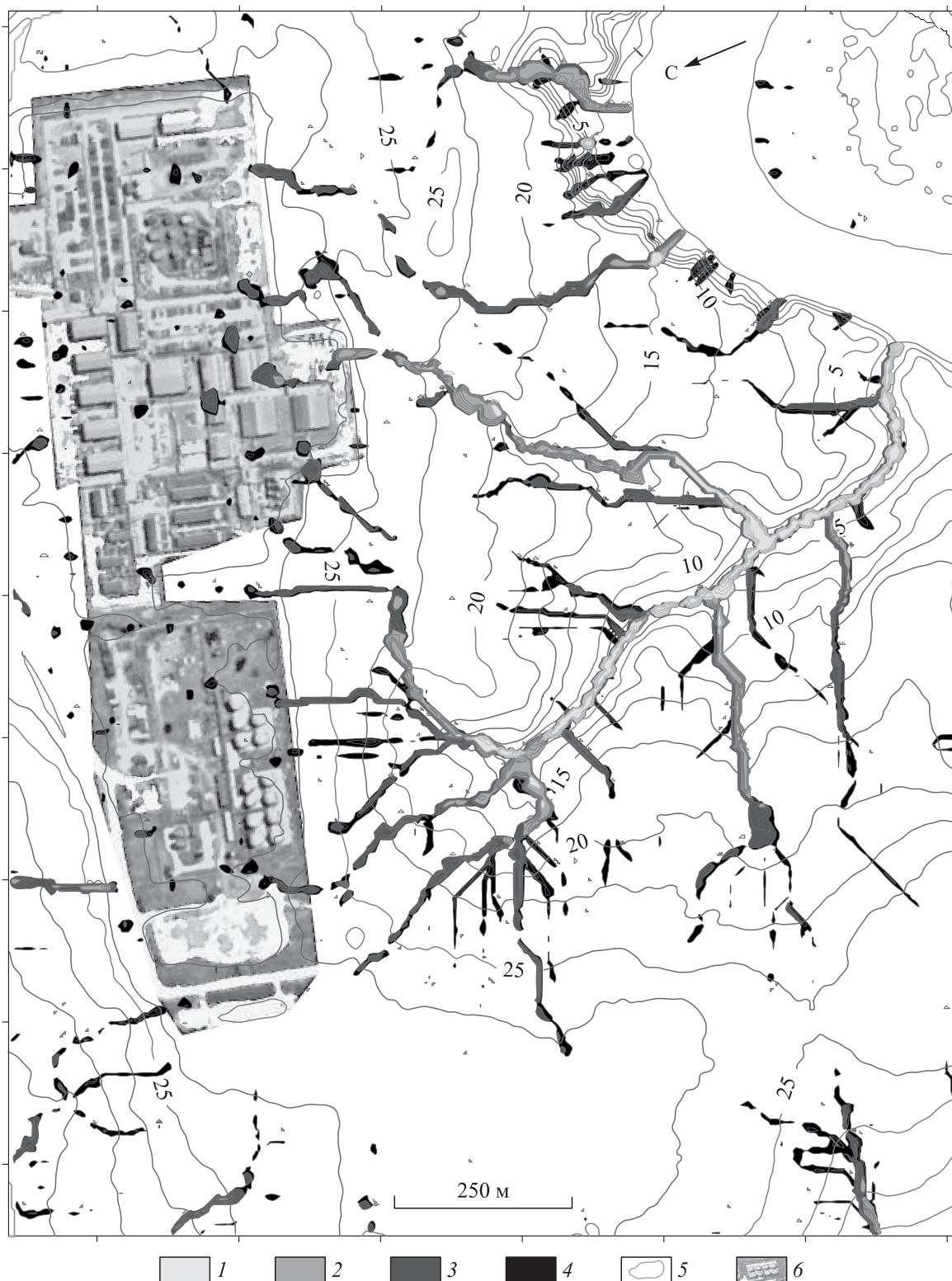


Рис. 1. Рассчитанный овражный потенциал для водосбора крупной балки (п-ов Ямал, Бованенковское газоконденсатное месторождение).

Критические скорости начала размыва верхнего слоя почвогрунтов  $U_{cr}$ , м/с: 1 — 0,5; 2 — 0,3; 3 — 0,4; 4 — 0,2.  
5 — изогипсы, м; 6 — территория пос. ПББ.

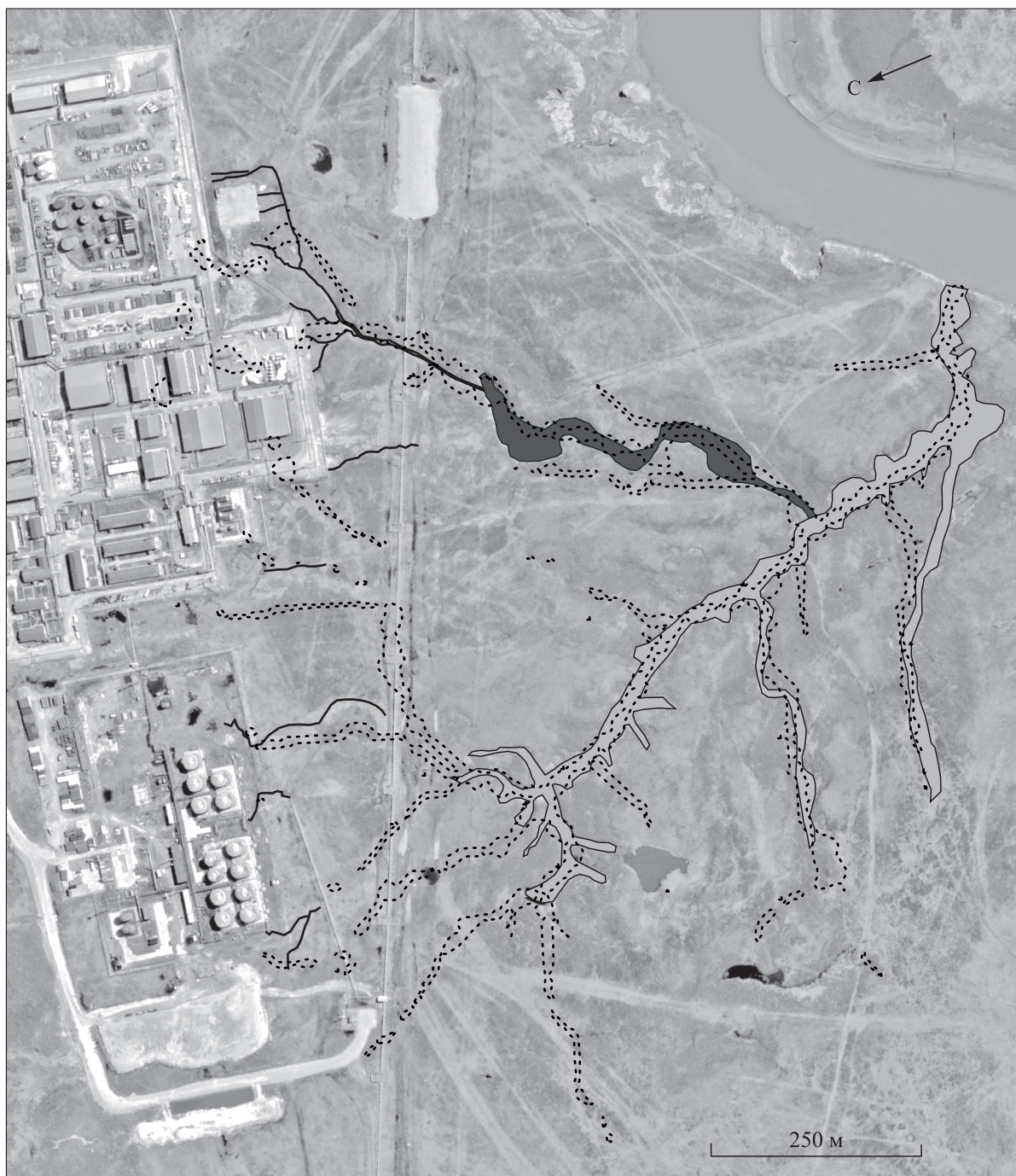


Рис. 2. Соответствие натурной эрозионной сети на снимке Google Earth 2016 г. рассчитанному ображному потенциалу при  $U_{cr} = 0,3$  м/с.

1 — основная балка; 2 — область быстрого сплыва лета 1988 г., где сформировался овраг Антропогенный; 3 — наиболее хорошо выраженные линейные эрозионные врезы; 4 — рассчитанный ображный потенциал при  $U_{cr} = 0,3$  м/с; 5 — сооружения пос. ПББ.

Расчеты ображного потенциала в основном подтверждают наблюдениями. Овраг Антропогенный сформировался на пологом левом борту основной балки в результате сочетания криогенных процессов: быстрого сплыва поверхностного слоя грунта и линейной эрозии в области антропогенного раз-

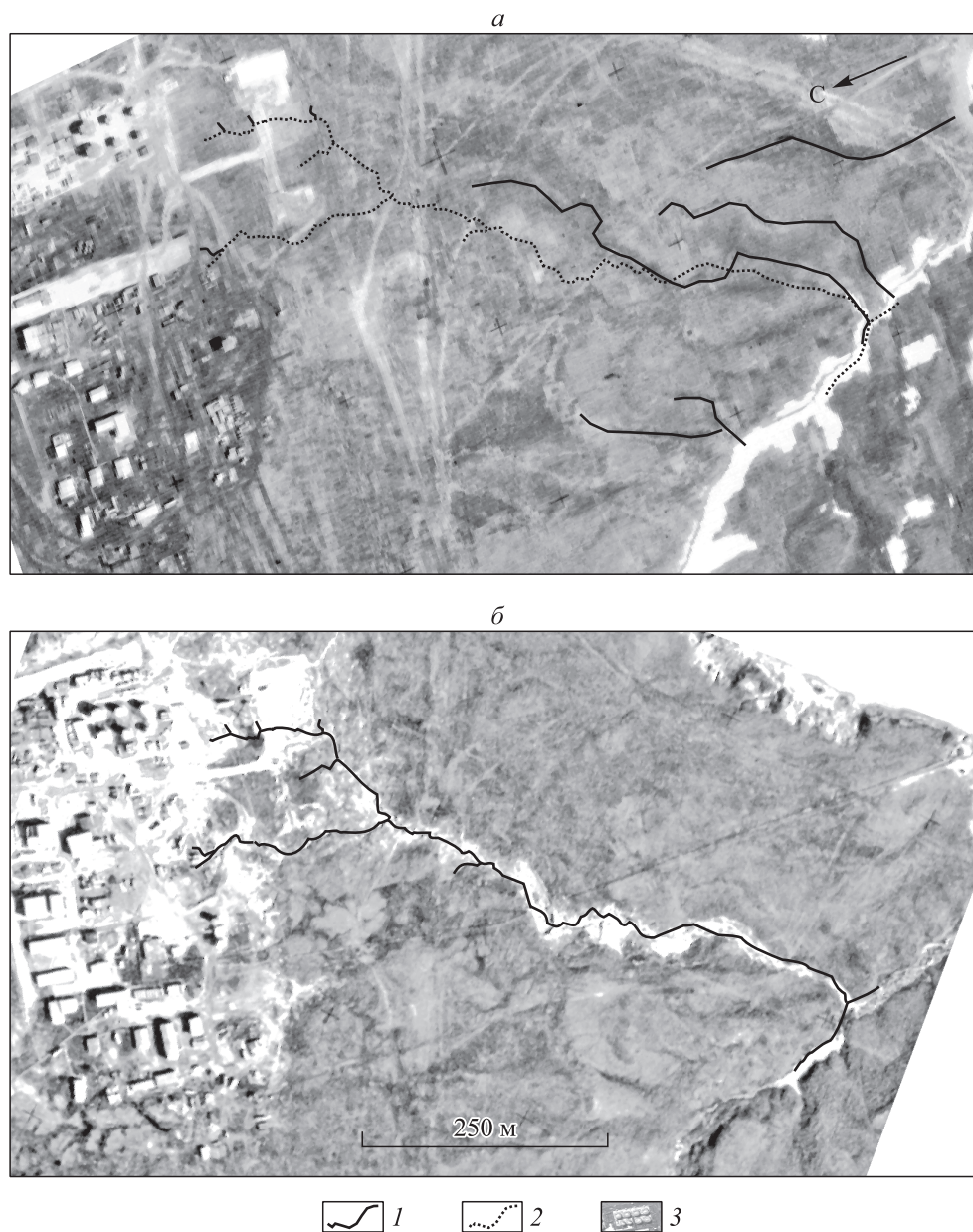


Рис. 3. Формирование оврага Антропогенного на склоне основной балки в 1988–1995 гг., когда был практически полностью реализован потенциал развития оврага в длину.

Фрагменты аэрофотоснимков с системой ложбин на склоне (1988 г.) до схода быстрого сплыва (а) и с оврагом Антропогенный (1995 г. на этапе максимального развития в длину) (б). 1 — ложбины 1988 г. и овраг Антропогенный в 1995 г.; 2 — проекция оврага Антропогенный на рельеф (1988 г.); 3 — сооружения пос. ПББ.

рушения естественного растительного покрова при сооружении площадки пос. ПББ. Овражная форма отсутствовала еще в июне 1988 г., но уже в июне 1989 г. имела длину 740 м, в 1990–1991 гг. — 940 м, в 1995 г. — 970 м (см. рис. 2; рис. 3). У оврага два активных тальвега и большое количество отвершков. Восточный тальвег развивается в районе вертолетной площадки пос. ПББ. Так как этот тальвег уже в 1991 г. пересек дорогу, ведущую на площадку, и его вершина достигла хранилища дизельного топлива, проводятся работы по засыпке местным материалом и заравниванию эрозионной формы бульдозером. В дорожном полотне, ведущем к вертолетной площадке, сооружен водопропуск. Эти меры во многом замедлили развитие овражной эрозии, однако не остановили ее. Происходит врезание русла оврага, а также увеличение перепада высот в его вершине и потенциала термоэрози-



онного процесса. Вершина северного основного тальвега оврага располагается в районе метеоплощадки, а его отвершки заходят на насыпь пос. ПББ и вплотную подходят к сооружениям на его краю. Как видно на рис. 2, к 2016 г. увеличение длины оврага прекратилось, а современная эрозионная сеть на водосборе балки соответствует потенциалу овражной эрозии при  $U_{cr} = 0,3$  м/с.

Современные эрозионно-аккумулятивные процессы в овраге Антропогенный определяются двумя основными явлениями: поступлением в вершину оврага большого количества тонкого песка в результате размыва насыпи пос. ПББ; распластыванием потока по плотному слою дернины с остатками растительности в нижней части. Эрозия песчаной насыпи поселка происходит большими темпами. По данным ГГИ, весной и летом 1993 г. было смыто около 1000 т наносов, т. е. около 90 т/га. Их вынос происходит по многочисленным промоинам длиной 1–5 м, шириной 0,3–1,5 м и глубиной 0,5–1,5 м. В результате днище оврага на протяжении верхних 650 м покрыто тонким песком с характерным дюнно-рифельным рельефом. Происходит аккумуляция и транзит песка, а эрозия коренных суглинистых грунтов резко замедлилась. По наблюдениям в период 1995–1997 гг., дно оврага практически не углубилось, а на отдельных участках было заилено.

На нижних 350–400 м долина оврага наследует обширную область быстрого сплыва лета 1988 г. Здесь продольный профиль оврага выпуклый, уклоны увеличиваются вниз по течению. Русло широкое (до 2,5–3 м), мелкое (средняя глубина составляет 10–20 см), распластанное. Оно разбито на многочисленные рукава островками, которые представляют собой фрагменты дерново-растительного покрова, разрушенного при быстром сплыве. Малые уклоны продольного профиля в средней части области распластанного русла привели к активной аккумуляции смываемых сверху наносов. По данным измерений ГГИ, в 1993 г. здесь отложилось около 300 т наносов.

Наибольший интерес представляет приустьевая часть оврага, где расположена область аккумуляции материала, сошедшего со склона при быстром сплыве. Здесь долина и русло сужаются, уклон увеличивается. Русло оврага совершенно не врежется в плотную дернину, переплетенную корнями полярной ивы.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Естественные овраги п-ова Ямал активны за счет малой устойчивости перигляциальных ландшафтов. В ходе антропогенного освоения криолитозоны эта естественная неустойчивость увеличивается в разы. В подобных условиях достаточно сложно выбрать участки для строительства вахтовых поселков, кустов скважин и, особенно, линейных объектов, которым бы не угрожали естественные или техногенные овраги. Именно поэтому необходима оценка безопасности техногенных объектов. При этом данное исследование показало, что статические модели овражной эрозии обладают существенными недостатками, из которых наиболее важный — сложность в назначении формирующих расходов воды. Этих недостатков лишены динамические модели, которые позволяют проводить расчеты в «реальном» времени на цифровых моделях рельефа и литологических толщ для всей последовательности расходов воды и других факторов эрозии во времени.

Оценка, выполненная с применением динамической модели, была проведена для одного из водосборов в области освоения Бованенковского газоконденсатного месторождения п-ова Ямал. Оценки овражного потенциала даны для четырех значений (от 0,2 до 0,5 м/с) критической скорости начала размыва верхнего слоя почвогрунтов с растительностью. Карты овражного потенциала, рассчитанного для критической скорости 0,2–0,3 м/с (сильно нарушенный растительный покров), достаточно точно соответствуют эрозионной сети на водосборе, которая сложилась более чем за 30 лет его освоения. Расчеты показывают, что овражно-балочная сеть территории в основном достигла своего максимально возможного развития. Плоские водоразделы, на которых нет современных оврагов, могут быть подвержены эрозии или при полном разрушении растительного покрова, или при существенном изменении гидрологического режима территории. Для оценки вероятности таких событий в будущем необходим климатический и гидрологический прогноз для территорий практически всех месторождений на п-ове Ямал.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (18–05–60147).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зорина Е.Ф. Овражная эрозия: закономерности и потенциал развития. — М.: ГЕОС, 2003. — 170 с.
2. Зорина Е.Ф. Расчетные методы определения потенциала овражной эрозии // Эрозия почв и русловые процессы. — 1979. — Вып. 7. — С. 81–89.
3. Сидорчук А.Ю. Модель для расчета морфометрии стабильного оврага // Геоморфология. — 1998. — № 2. — С. 43–52.
4. Patton P.C., Shumm S.A. Gully erosion, northern Colorado: a threshold phenomenon // Geology. — 1975. — N 3. — P. 88–90.
5. Begin Z.B., Schumm S.A. Instability of alluvial valley floors: a method for its assessment // Transactions of the ASAE. — 1979. — N 22. — P. 347–350.
6. Begin Z.B., Schumm S.A. Gradational thresholds and landform singularity: significance for Quaternary studies // Quaternary Research. — 1984. — N 27. — P. 267–274.
7. Harvey M.D., Watson C.C., Schumm S.A. Gully erosion: Tech. Note 366. — Washington: U. S. Dep. of the Inter., Bur. of Land Management, 1985. — 181 p.
8. Гарцман Б.И. Анализ геоморфологических условий формирования первичных водотоков на основе цифровых моделей рельефа // География и природ. ресурсы. — 2013. — № 1. — С. 136–147.
9. Vandaele K., Poesen J., Govers G., Wesemael B. van. Geomorphic threshold conditions for ephemeral gully incision // Geomorphology. — 1996. — N 16. — P. 161–173.
10. Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. — М.: Изд-во АН СССР, 1955. — 346 с.
11. Сидорчук А.Ю. Динамическая модель овражной эрозии // Геоморфология. — 1998. — № 4. — С. 28–38.
12. Sidorchuk A. Gully erosion in the cold environment: Risks and hazards // Advances in Environmental Research. — 2015. — Vol. 44. — P. 139–192.
13. Сидорчук А.Ю. Антропогенная овражная эрозия и термоэрозия в западной части центрального Ямала // Геоморфология. — 2000. — № 3. — С. 95–103.
14. Косов Б.Ф., Никольская И.И., Зорина Е.Ф. Экспериментальные исследования оврагообразования // Экспериментальная геоморфология. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1978. — Т. 3. — С. 113–140.
15. Sidorchuk A., Märker M., Moretti S., Rodolfi G. Soil erosion modelling in the Mbuluzi River catchment (Swaziland, South Africa). Part I: Modelling the dynamic evolution of gullies // Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria. — 2001. — Vol. 24, N 2. — P. 177–187.
16. Косов Б.Ф. Овражная эрозия в зоне тундры // Науч. докл. Высш. школы. Геол.-географ. науки. — 1959. — № 1. — С. 123–131.
17. Косов Б.Ф. Овражная эрозия в Сибири // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. — 1960. — № 3. — С. 54–59.
18. Гельфан А.Н. Модель стока воды при снеготаянии и при дождях // Эрозионные процессы центрального Ямала. — СПб.: Изд-во Рос. науч.-исслед. ин-та культурного и природного наследия, 1999. — С. 205–224.
19. Виноградов Ю.Б. Математическое моделирование процессов формирования стока: опыт критического анализа. — Л.: Гидрометеиздат, 1988. — 312 с.
20. Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А., Журавлёв С.А., Журавлёва А.Д. Математическое моделирование гидрографов стока с неизученных бассейнов рек полуострова Ямал // Вестн. Санкт-Петерб. ун-та. Сер. 7. География. География. — 2014. — № 3. — С. 71–81.
21. Бобровицкая Н.Н., Баранов А.В., Василенко М.Н., Зубкова К.М. Сток воды и наносов на овражных водосборах // Эрозионные процессы центрального Ямала. — СПб.: Изд-во Рос. науч.-исслед. ин-та культурного и природного наследия, 1999. — С. 90–105.
22. ArcticDEM. 2018 Harvard Dataverse V1 [Электронный ресурс]. — [https:// doi.org/10.7910/DVN/ОННУКН](https://doi.org/10.7910/DVN/ОННУКН) (дата обращения 12.12.2018).
23. QGIS Development Team. 2004–2014. V3.4 [Электронный ресурс]. — <https://qgis.org> (дата обращения 15.12.2018).
24. Григорьев В.Я., Сидорчук А.Ю. Прогноз дождевой эрозии тундровых почв полуострова Ямал // Почвоведение. — 1995. — № 3. — С. 351–357.
25. Sidorchuk A., Grigorev V. Soil erosion on the Yamal Peninsula (Russian Arctic) due to gas field exploitation // Advances in GeoEcology. — 1998. — Vol. 31. — P. 805–811.

*Поступила в редакцию 29.01.2019*

*После доработки 29.01.2019*

*Принята к публикации 25.12.2019*