

УДК 551.435.1:624.131(476)

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛОРУССИИ ПОД ВЛИЯНИЕМ ЭРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

© 2024 г. А. И. Павловский^{1,*}, А. Н. Галкин^{2,**}, И. А. Красовская², О. В. Шершнева^{3,***}

¹Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости 65, Минск, 220013 Беларусь

²Витебский государственный университет имени П.М. Машерова,
Московский пр. 33, Витебск, 210038 Беларусь

³Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины,
ул. Советская 104, Гомель, 246028 Беларусь

*E-mail: aipavlovsky@mail.ru

**E-mail: galkin-alexandr@yandex.ru

***E-mail: natstudy@yandex.ru

Поступила в редакцию 13.03.2024 г.

После доработки 12.04.2024 г.

Принята к публикации 20.07.2024 г.

В статье приведены результаты комплексного изучения условий развития и особенностей проявления водно-эрозионных процессов в различных природно-хозяйственных обстановках, как важное условие формирования инженерно-геологических особенностей территории. Установлено, что развитие, формы проявления и интенсивность водно-эрозионных процессов на территории Беларуси при всем многообразии природно-хозяйственных обстановок определяют энергетический потенциал рельефа, бассейновая структура территории и хозяйственная деятельность человека. Проведена типизация инженерно-геологических условий развития водно-эрозионных процессов. Наиболее сложные инженерно-геологические обстановки сложились в пределах краевых ледниковых возвышенностей, имеющих высокий энергетический потенциал рельефа, двухпородный тип грунтовой толщи, сложную бассейновую структуру, а также на территориях активного инженерно-хозяйственного освоения.

Ключевые слова: водно-эрозионно-аккумулятивный цикл, эрозия, аккумуляция, ручейковая сеть, временные русловые потоки, овраги, делювиальный смыв, конус выноса

DOI: 10.31857/S0869780924040012 EDN: SGMTKO

ВВЕДЕНИЕ

Изучению современного морфолитогенеза в настоящее время уделяется большое внимание, причем одним из самых актуальных направлений подобных работ является исследование водно-эрозионных процессов в рамках единого водно-эрозионно-аккумулятивного цикла. Это обуславливается прежде всего значительным материальным ущербом, наносимым деятельностью текучих вод, в результате которой разрушаются инженерные сооружения и коммуникации, уничтожаются сельскохозяйственные угодья, лесные насаждения и др. Кроме того, интенсивное развитие водно-эрозионных процессов значительно ухудшает среду обитания человека, обостряя и без того серьезные экологические проблемы. При этом необходимо отметить, что в каждом регионе эти процессы проявляются своеобразно и требуют специальных разносторонних исследований. Без таких работ невозможно решить сложный

комплекс задач, связанных с инженерным освоением территории, рациональным использованием природных ресурсов, улучшением экологической обстановки.

Флювиальный литоморфогенез развивается по принципу катены, основными звеньями которой являются делювиальный смыв и аккумуляция – эрозия и аккумуляция временных русловых потоков – эрозия и аккумуляция постоянных русловых потоков, которые привязаны к определенным гипсометрическим уровням, на каждом из которых происходит эрозия, транспорт и аккумуляция наносов. Важнейшие законы развития, взаимосвязь и взаимобусловленность проявления всех видов флювиальных процессов, сопряженность их развития во всех звеньях сети водных потоков сформулированы в работах Н.Е. Кондратьева, И.В. Попова, Ф.В. Снищенко [9], Н.И. Маккавеева [12–14], А.Ю. Сидорчука [28], Р.С. Чалова [14, 28] и др.

Единство и взаимосвязь всех звеньев водно-эрозионно-аккумулятивного цикла (флювиальный литоморфогенез) проявляются на склонах возвышенностей, речных долин, овражно-балочных сетей, образуя делювиальные, аллювиальные и пролювиальные отложения, а также характерные для этого цикла формы рельефа: эрозионные — овраги, балки, долины рек; и аккумулятивные — конусы выноса, поймы, террасы и дельты рек.

Важно отметить, что в системе постоянно происходят процессы, с одной стороны, приводящие к выполаживанию неровностей и уменьшающие расчлененность рельефа, а с другой — увеличивающие расчлененность рельефа и приводящие к образованию выработанных форм. Везде, где имеется сток, происходит естественная нормальная эрозия, которая в условиях интенсивного инженерно-хозяйственного освоения резко возрастает.

Все звенья водно-эрозионно-аккумулятивного цикла оказывают большое влияние на формирование инженерно-геологических условий территорий и часто изучаются в отдельности, хотя переходы из одного вида в другой происходят постепенно, без резких границ и строгих классификационных признаков, определяя тем самым непрерывность эрозионного процесса [5]. В то же время флювиальные процессы, наряду с непрерывностью, имеют и прерывистый характер, что отражается в их структурном положении в рельефе на определенных гипсометрических уровнях, которые между собой тесно взаимосвязаны. Каждое звено водно-эрозионно-аккумулятивного цикла имеет разные пространственно-временные параметры и формирует свойственные ему рельеф и отложения [4].

В пределах Беларуси флювиальные процессы на позднелейстоцен-голоценовом этапе являются самыми существенными по литоморфогенетическому значению экзогенными геологическими и инженерно-геологическими процессами. Их изучением в разные годы занимались Б.С. Болдышев [1, 2], А.Н. Галкин [3, 4, 27], В.В. Жилко [1, 2, 6], Г.А. Колпашников [7, 8], А.А. Лепешев [10, 11], А.В. Матвеев [4, 15–20], В.М. Мотуз [22, 23], Л.А. Нечипоренко [15–17], А.И. Павловский [3, 4, 17–21, 24–27] и др. Работы этих авторов посвящены изучению условий и факторов развития и пространственной дифференциации водно-эрозионных процессов, районированию территории республики в отношении эрозионных процессов, их интенсивности в различные сезоны. Ими описаны морфолого-морфометрические характеристики овражно-балочной сети, обоснована необходимость проведения в этих районах противоэрозионных мероприятий, составлен ряд карт, характеризующих развитие овражной и плоскостной эрозии на территории Беларуси, заложены стоковые площадки, проводились стационарные наблюдения процессов эрозии почв, изучалась эффективность мероприятий по борьбе с ней.

Цель данной работы — комплексное изучение верхних звеньев водно-эрозионно-аккумулятивного цикла (делювиальный смыв и аккумуляция, эрозия и аккумуляция временных русловых потоков) в различных природно-хозяйственных обстановках, как важное условие формирования инженерно-геологических особенностей территории Беларуси.

Работа базируется на анализе фактического материала, собранного и обработанного авторами более чем за 35-летний период, на основе использования данных собственных натурных наблюдений за развитием плоскостной и линейной эрозии и аккумуляции (рис. 1), аэрофото- и космических снимков, литературных и других открытых источников информации, фондовых материалов различных геологических организаций.

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ВОДНО-ЭРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Территория Беларуси занимает западную часть Восточно-Европейской равнины и входит в область развития четвертичных покровных материковых оледенений, оказавших непосредственное влияние на формирование толщи поверхностных отложений и рельефа региона.

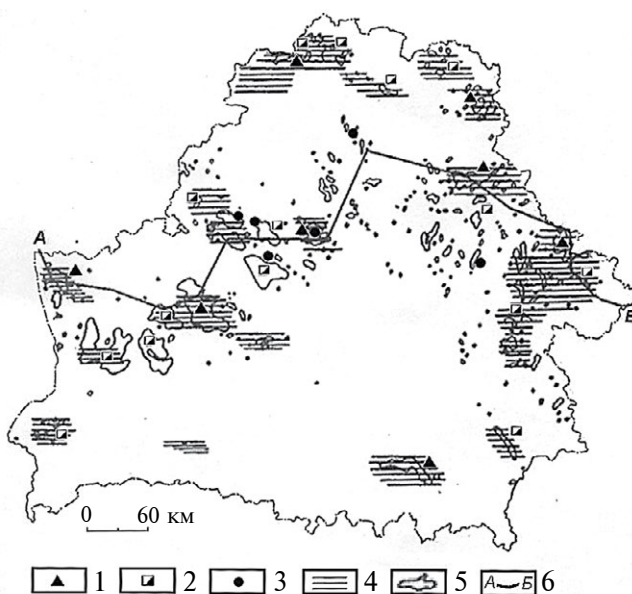


Рис. 1. Картограмма фактического материала. 1 — участки инструментальной съемки форм линейной эрозии; 2 — участки детальных полевых исследований водно-эрозионных процессов; 3 — участки, на которых получены количественные характеристики плоскостной эрозии по литературным данным; 4 — территории, на которых проводились общие геолого-геоморфологические исследования; 5 — территории распространения форм линейной эрозии; 6 — линия геолого-геоморфологического профиля.

На позднелепесточен-голоценовом этапе происходит интенсивное преобразование реликтовых морфоскульптур ледникового, флювиогляциального, лимногляциального генезиса и формирующих их отложений современными геологическими процессами, где значительная роль принадлежит водно-эрозионному литоморфогенезу, особенности проявления которого показаны в табл. 1.

Развитие водно-эрозионных процессов на территории страны в значительной степени предопределено комплексом современных природно-антропогенных условий, которые можно разделить на климатические, морфометрические, геологические, почвенно-растительные и техногенные группы факторов.

Влияние этих групп факторов на развитие процессов отличается пространственно-временной неоднородностью. Компонентный анализ наиболее существенных параметров (крутизна и длина склонов, густота и глубина расчленения рельефа, состав и допустимые неразмыывающие скорости покровных отложений, режим влажности, лесистость, распаханность площади водосборов и т.д.) позволил выделить три главные компоненты, вклад которых в общую дисперсию комплекса показателей превышает 50% [25, 29].

Первая главная компонента имеет вклад 27.5% общей дисперсии, и максимальные компонентные положительные веса приходятся на вертикальное расчленение и крутизну склонов, отрицательные – на длину речной сети и площадь водосборных бассейнов. Учитывая компонентные веса и распределение значений по карте, первую главную компоненту можно рассматривать как интегральный фактор влияния морфометрических характеристик на развитие флювиальных

процессов. Основная особенность пространственной дифференциации первой главной компоненты – это соотношение топографических ступеней и противопоставление возвышенностей Центральной Белоруссии низинам Полесья и Поозерья (рис. 2а).

Вторая главная компонента (15.9%) характеризуется следующими особенностями: положительные веса приходятся на площади водосборных бассейнов и длины водотоков, отрицательные – на слой стока в период снеготаяния и лесистость. Она отражает широтные различия (северная, центральная и южная части республики) и влияние бассейновой раздробленности территории на развитие водно-эрозионных процессов (рис. 2б).

Для третьей главной компоненты (12.8%) максимальные положительные веса приходятся на лесистость, густоту расчленения рельефа и площади водосборных бассейнов, отрицательные – на распаханность территории и величину слоя поверхностного среднегодового стока. Картографическая интерпретация полученных результатов отражает влияние степени хозяйственной освоенности территории на интенсивность водно-эрозионных процессов (рис. 2в).

Значительный процент, приходящийся на другие компоненты (в сумме >40%), свидетельствует о высокой изменчивости исследуемых процессов и их зависимости от внешних и внутренних факторов.

Таким образом, развитие, формы проявления и интенсивность водно-эрозионных процессов на территории Белоруссии определяют энергетический потенциал рельефа, бассейновая структура территории и хозяйственная деятельность человека.

Таблица 1. Особенности проявления водно-эрозионных процессов на территории Белоруссии

Арена проявления	Основные типы водотоков	Вид проявления процессов	Вид рельефа	Формы рельефа	Тип отложений
Склоновые поверхности	Пластовые (временные)	Плоскостная эрозия	Выработанный	Лопастные, линейные, овальные микропонижения	Делювий
		Рассредоточенная аккумуляция	Аккумулятивный	Маломощные делювиальные шлейфы	
	Микро-русовые (временные)	Ручейковая эрозия	Выработанный	Разнопорядковая ручейковая сеть	
		Присклоновая аккумуляция	Аккумулятивный	Сегментные микроконусы выноса	
Овражно-балочные системы	Русловые (временные)	Линейная эрозия	Выработанный	Промоины, овраги, балки	Пролувий
		Сосредоточенная аккумуляция	Аккумулятивный	Сегментные конусы выноса, балочные террасы	

ДЕЛЮВИАЛЬНЫЙ СМЫВ И АККУМУЛЯЦИЯ

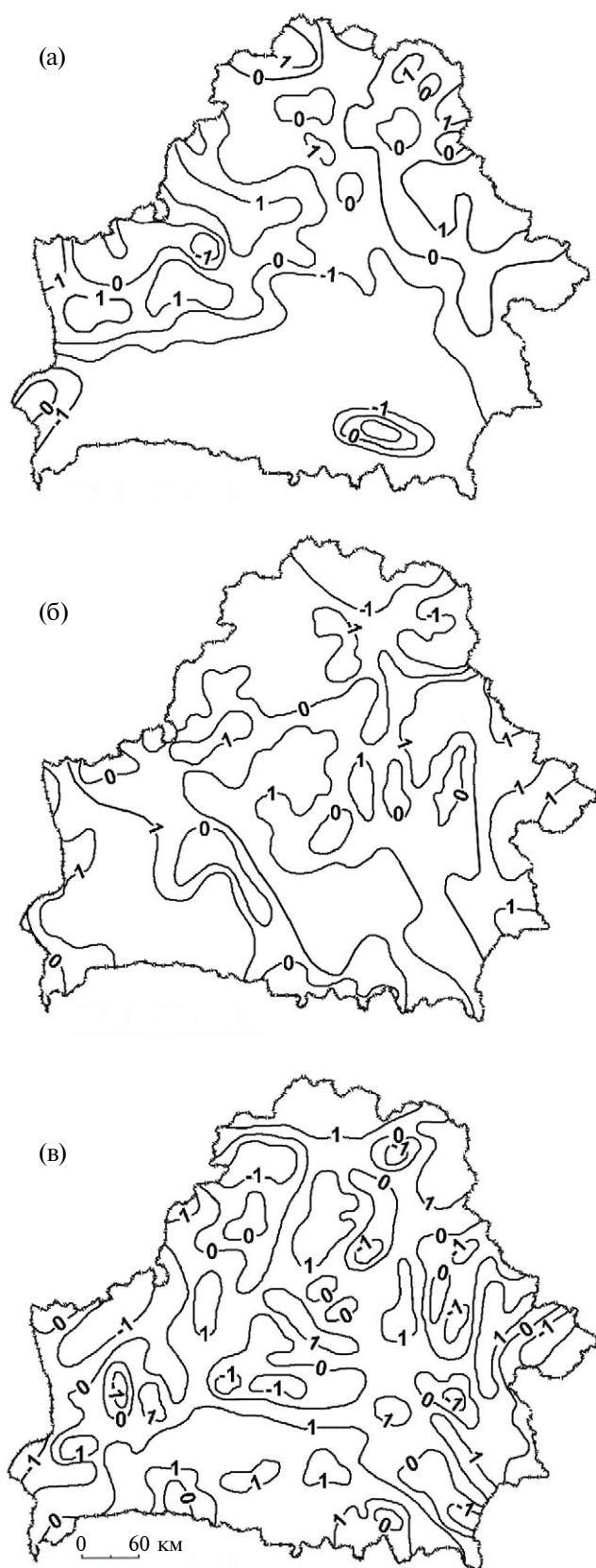


Рис. 2. Значения первой (а), второй (б) и третьей (в) главных компонент комплекса параметров, характеризующих условия развития водно-эрозионных процессов на территории Беларуси.

Делювиальный смыв и аккумуляция на территории Беларуси на задернованных и залесенных склонах проявляется очень слабо и активизируется на площадях, используемых в инженерно-хозяйственных целях. На приводораздельных пространствах развивается пластовый и ручейковый (струйчатый) сток, формирующийся при объеме осадков, превышающем количество воды, необходимого для смачивания почвы и растительности. Глубина таких потоков зависит от микрорельефа, шероховатости и других особенностей склонов и изменяется от нескольких миллиметров до первых сантиметров. В результате на склонах образуются микропонижения различной формы, подготавливающие склон к струйчатому размыву. Морфологическая роль ручейкового стока более значительна, особенно на территориях интенсивного хозяйственного использования, и проявляется в формировании разнопорядковой ручейковой сети, формирующей особый микрорельеф (рис. 3).

Оценка интенсивности плоскостного смыва на территории Беларуси была выполнена на основании числового моделирования и последующих верификации модели и корректуры вычислительного алгоритма посредством сопоставления расчетных величин с результатами полевых и стационарных наблюдений [25]. Интенсивность смыва с используемых в инженерно-хозяйственных целях земель изменяется от 0.008 до 10.0 мм, составляя в среднем 0.42 мм в год (рис. 4). Максимальные среднегодовые значения плоскостного смыва со склонов (10 мм и более) характерны для краевых ледниковых возвышенностей (Гродненская, Волковысская, Новогрудская, Минская, Оршанская). Рельеф этих территорий в основном холмисто-увалистый или грядово-холмистый, осложненный овражно-балочно-долинной сетью с выравненными водораздельными участками, которые занимают менее 20% общей площади. Гидрографическая сеть хорошо разработана. Крутизна склонов достигает 3° – 10° , а длина – 0.2–1.0 км. Густота эрозионной сети часто превышает 1 км/км^2 , а глубина вертикального расчленения изменяется в пределах 20–50 м. Для возвышенностей характерен пестрый вещественный состав отложений, но чаще всего с поверхности залегают легкоразмываемые песчаные, супесчаные и лессовидные отложения. Все эти природные особенности в совокупности с повышенным количеством осадков (более 600 мм) создают условия для интенсивной эрозии.

Делювиальный смыв определяет баланс вещества на различных участках склона. В привершинных и наиболее крутых частях склона наблюдается размыв, по мере насыщения наносами (при постоянном уклоне) возникают зоны транзита, а у подножья склонов формируются микроконусы выноса и делювиальные шлейфы. В целом



Рис. 3. Ручейковая сеть на склоне Минской возвышенности [11].

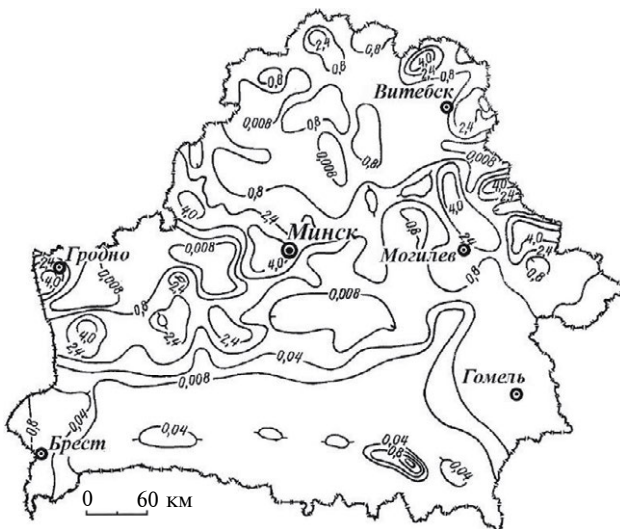


Рис. 4. Величина смыва со склонов, мм/год [4].

следует отметить, что в результате развития делювиальных процессов происходит значительное преобразование земной поверхности, высота возвышенностей юга Белоруссии уменьшилась на 15–20 м, а в северных на 3–5 м, при этом образовались шлейфы делювиально-пролювиальных отложений мощностью от 2 до 5 м [17].

ЭРОЗИЯ И АККУМУЛЯЦИЯ ВРЕМЕННЫХ РУСЛОВЫХ ПОТОКОВ

Формирование водных потоков, обладающих достаточной эрозионной и транспортирующей способностью, приводит к трансформации планетарного склонового стока в русловой, а также

усилению эрозионного процесса и образованию промоин, перерастающих в овраги. Часто можно наблюдать, как по мере увеличения “живой силы” водного потока вниз по склону, прослеживается вся цепочка образования линейной эрозионной формы. Развитие линейной эрозионной формы приводит к изменению взаимодействия русловых и склоновых процессов в следующей последовательности:

- 1) интенсивное взаимодействие руслового и склоновых процессов (морфологическая молодость эрозионной формы);
- 2) уменьшение влияния русловых процессов и увеличение роли склоновых процессов (медленный крип, плоскостной смыв, пролювиальные и делювиальные аккумуляции);
- 3) уменьшение роли склоновых процессов и относительная стабилизации развития эрозионной формы.

Такой способ образования линейных форм эрозии можно назвать открытым.

Кроме того, на территории Белоруссии встречается и “закрытый” (или тоннельный) способ образования эрозионных форм, получивший широкое развитие в районах распространения лёссовых и лёссовидных толщ значительной мощности – более 5 м (Новогрудская, Минская возвышенности, Мозырская гряда, Могилевская и Горецкая равнины). В данном случае механизм образования форм линейной эрозии будет тесным образом связан с проявлением суффозионного процесса, когда в грунтовом массиве вначале в результате интенсивной инфильтрации воды происходит расширение пор, каналов и трещин, формируются суффозионные колодцы глубиной

от 0.5 до 2.5 м и диаметром от 0.3 до 1.5 м, соединенные тоннелями. Эти тоннели впоследствии размываются и расширяются, происходит активный вынос продуктов разрушения за пределы массива; своды их обрушаются и образуются провалы глубиной 2–9 м и диаметром до 25 м. Активная роль при этом принадлежит склоновым процессам. На дне провалов возможно возникновение новой серии колодцев и тоннелей. В результате одного или нескольких циклов тоннельной эрозии формируется овраг, в дальнейшем развивающийся обычным образом (рис. 5).

Бурный рост первичной эрозионной формы с сокращением площади водосбора в верховьях и уменьшением крутизны тальвега в низовьях постепенно замедляется, а при достижении предельных значений может прекращаться. Некоторое время объем оврага может увеличиваться за счет склоновых процессов. Постепенно происходит стабилизация эрозионной формы, склоны выполаживаются, днище расширяется, зарастает и образуется балка.

Эрозия и аккумуляция временных русловых потоков развита примерно на 7% территории Белоруссии. Наиболее широко линейная эрозия проявляется в пределах краевых ледниковых возвышенностей – Минской, Новогрудской, Ошмянской, Гродненской, Оршанской, Витебской, Волковысской и др., а также на значительных участках Могилевской и Горецкой равнин и в прибортовых частях крупных речных долин (рр. Днепр, Неман, Западная Двина, Березина, Сож и др.). Это обусловлено прежде всего природными особенностями этих территорий, а именно значительным перепадом высотных отметок на участках различных геоморфологических элементов (до 50 м и более), длиной склонов до 0.2–1.0 км и более, их крутизной 3°–10° и более, пестрым составом покровных отложений с преобладанием легкоразмываемых песков, супесей и лессовидных супесчано-суглинистых образований, значительным количеством осадков в течение года (более 600 мм) и длительным хозяйственным освоением. На этих участках плотность и густота овражно-балочной сети достигают максимальных значений – плотность 4–6 ед./км², реже до 7–10 ед./км² (рис. 6а), а густота – 0.7–0.9 км/км² (рис. 6б), на отдельных площадях Новогрудской и Мозырской возвышенностях до 5–7 км/км². В наименьшей степени эрозии временных водотоков подвержены участки Загородья, Высоковской и Чечерской равнин, где плотность эрозионных форм не превышает 1 ед./км², а густота эрозионной сети измеряется 0.1–0.4 км/км², в то время как на остальной территории с распространением овражно-балочного рельефа эти показатели составляют 1–2 ед./км² и 0.4–0.5 км/км² соответственно.

Важным параметром количественной оценки интенсивности эрозионных процессов является

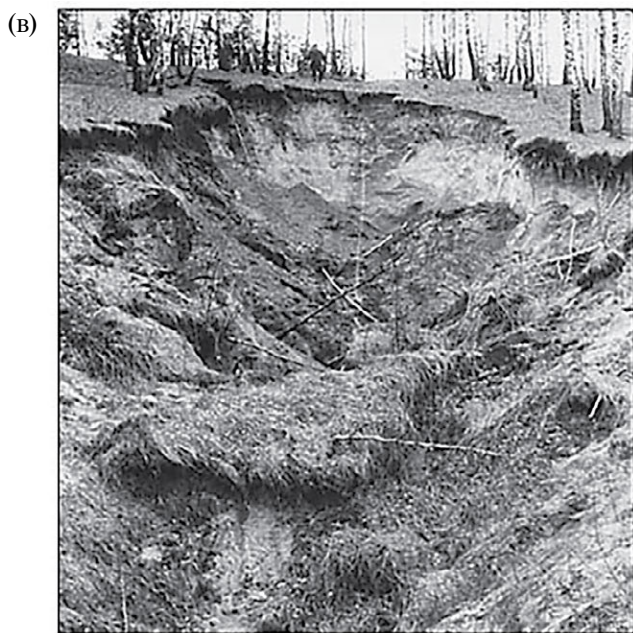
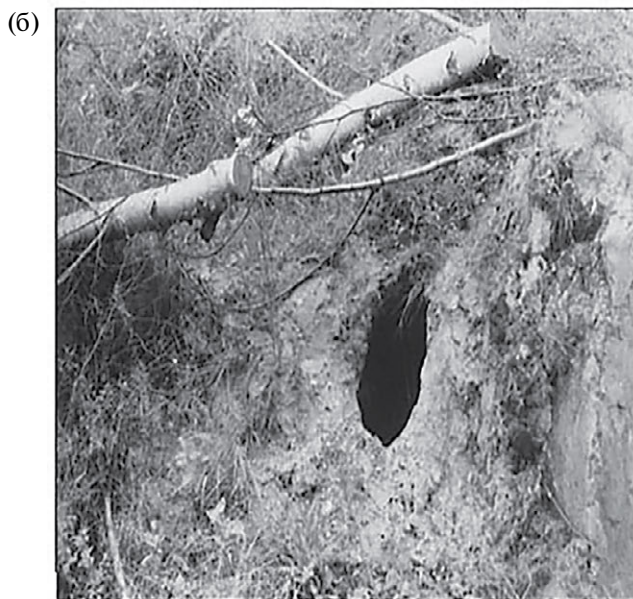
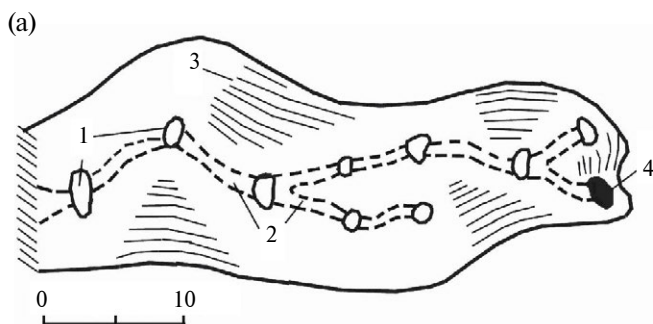


Рис. 5. Схема (а) и формы проявления тоннельной эрозии: б – суффозионный колодец; в – суффизионно-провальный овраг. 1 – колодцы; 2 – связывающие их тоннели; 3 – оползни и осыпи; 4 – водобойный колодец [4].

скорость роста оврагов. По расчетам и инструментальным измерениям современные средние скорости овражной эрозии изменяются в пределах 0.3–3.5 м/год. Необходимо отметить возрастное и морфологическое разнообразие форм линейной эрозии в пределах страны. Широко развиты молодые, активно растущие формы, представляющие собой короткие крутостенные глубокие промоины с висячими устьями, или различные по размерам овраги, приуроченные большей частью к береговому уступу надпойменных террас или участкам пересечения долинами рек возвышенностей и имеющие резко выраженные бровки, крутые, обнаженные и интенсивно обрушающиеся склоны. Довольно часто такие овраги в привершинной части имеют форму амфитеатра, а в средней и особенно нижней – V-образную форму, часто с крутым падением тальвега. Длина оврагов обычно составляет 100–150 м, реже 200–300 м (до 1 км), глубина – до 20–30 м, а ширина поверху – до 30–50 м [24, 25].

Нередко активные овраги возникают при повторном цикле эрозии, когда они врезаются в ложбины стока ледниковых вод и днища древних балок. Встречаются относительно старые, в значительной своей части заросшие овраги. Длина их обычно составляет 0.3–0.5 км, местами до 1.5 км, а глубина – 20–30 м. Поперечный профиль оврагов чаще U-образный, реже V-образный, по форме явно преобладают линейно-вытянутые и булавовидные разновидности, днище хорошо выражено, обычно залесено или задерновано. Склоны в большинстве мест закреплены растительностью. Процессы эрозии в таких оврагах протекают обычно локально, растут они в естественных условиях медленно. Крупные овраги, длиной до 2.0–2.5 км (максимально до 5.5 км) и глубиной вреза до 50 м, встречаются существенно реже.

Разнообразие развития и активное влияние верхних звеньев водно-эрозионно-аккумулятивного цикла (делювиальный смыл и аккумуляция – эрозия и аккумуляция временных русловых потоков) на формирование инженерно-геологических особенностей территории Белоруссии позволили по определенным наборам классификационных признаков выделить наиболее типичные условия их проявления. Характерные для каждого типа параметры указаны в табл. 2. В основу разработанной типизации был положен принцип однородности количественных характеристик выделяемых объектов. При решении этой задачи использовалось 10 параметров, на основании которых выделено 6 типов территорий по условиям развития водно-эрозионных процессов (рис. 7).

В настоящее время делювиальный смыл и линейная эрозия наиболее активно проявляются в районах интенсивного инженерно-хозяйственного освоения. В результате нарушения

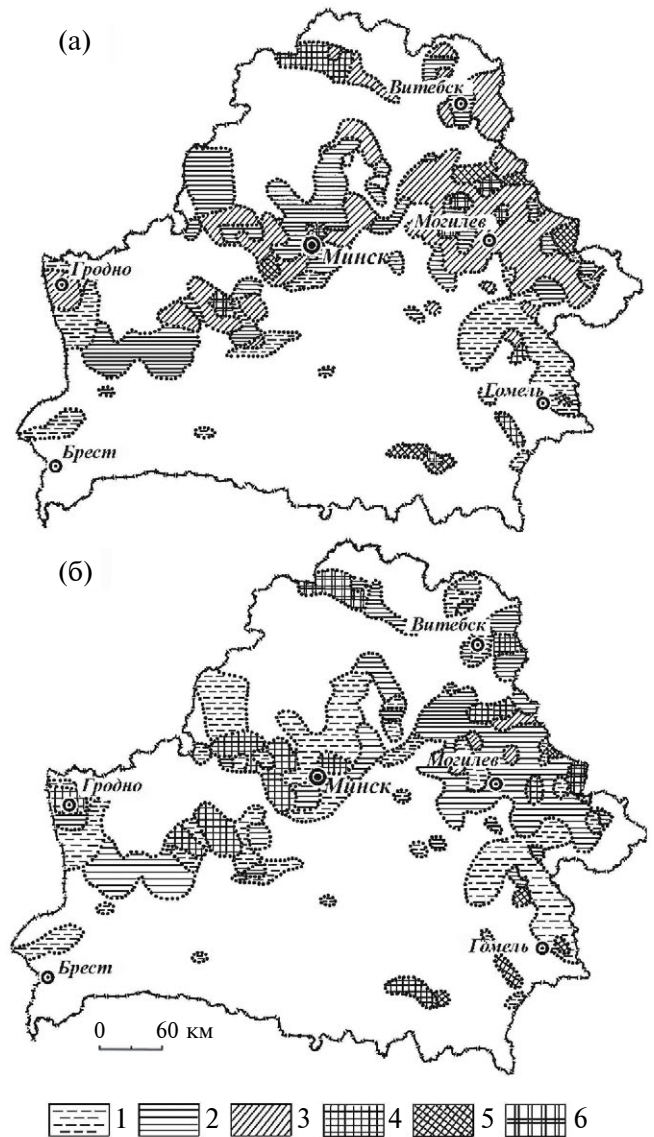


Рис. 6. Схематические карты плотности (а) и густоты (б) форм линейной эрозии [4]. Плотность, [ед./км²]: 1 – до 1.0; 2 – 1.1–2.0; 3 – 2.1–4.0; 4 – 4.1–6.0; 5 – 6.1–7.0; 6 – более 7.0.

Густота, [км/км²]: 1 – 0.40 и менее; 2 – 0.41–0.50; 3 – 0.51–0.60; 4 – 0.61–0.70; 5 – 0.71–0.80; 6 – 0.81 и более.

растительного покрова, изменения водопроницаемости грунтов, потери их структуры, происходят перераспределение поверхностного стока, изменение гидрологического режима малых водосборов в сторону концентрации и неравномерности поверхностного стока и как следствие возрастание вероятности развития опасных геоморфологических процессов. Морфология и характер развития и проявления аналогичен формам, образующимся в естественных условиях, но резко возрастают скорости смыва поверхностных отложений и линейного роста оврагов, достигающие 10–100 м/год, а также усиливаются склоновые

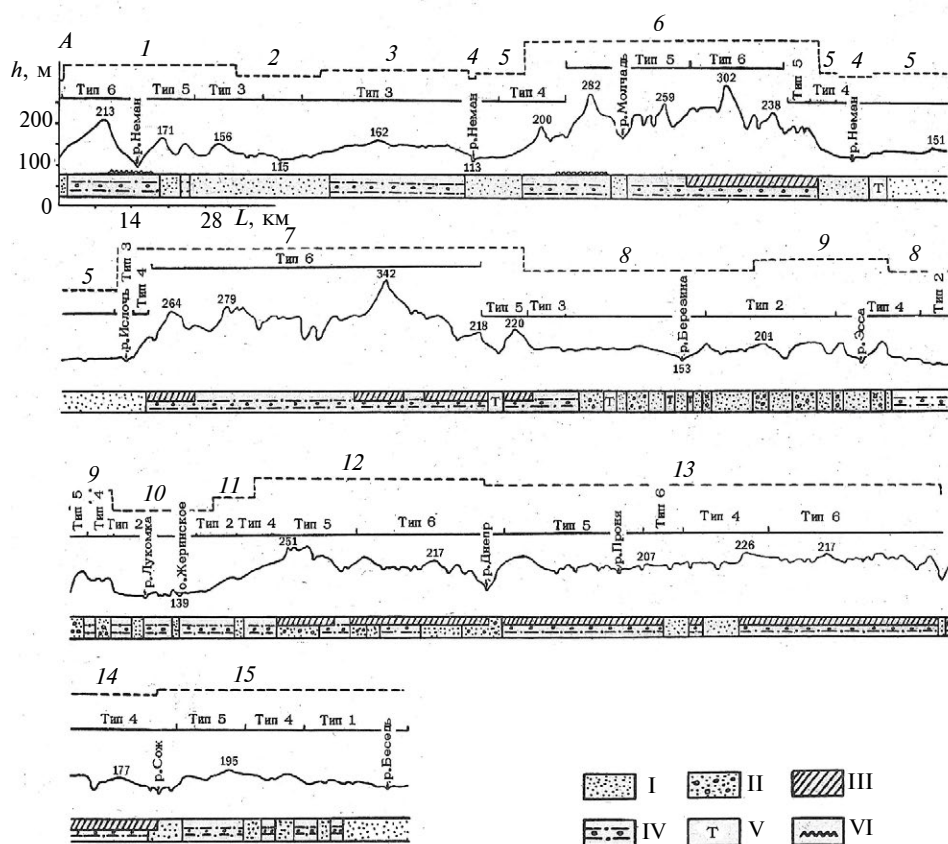


Рис. 7. Профиль по линии А–Б (см. рис. 1), отражающий инженерно-геологические условия развития водно-эрозионных процессов на территории Белоруссии. Тип отложений и строение грунтовой толщи: I – пески; II – песчано-гравийно-галечный материал; III – лессовидные супеси и суглинки; IV – моренные супеси и суглинки; V – торф; VI – напорные краевые морены. Геоморфологические районы: 1 – Гродненская краевая ледниковая возвышенность; 2 – Скидельская озерно-ледниковая низина; 3 – Лидская моренная равнина; 4 – долина р. Неман; 5 – Любчанская водно-ледниковая низина; 6 – Новогрудская краевая ледниковая возвышенность; 7 – Минская краевая ледниковая возвышенность; 8 – Верхнеберезинская водно-ледниковая равнина; 9 – Лукомская краевая ледниковая возвышенность; 10 – Чашникская водно-ледниковая низина; 11 – Сенненская моренная равнина; 12 – Оршанская краевая ледниковая возвышенность; 13 – Горечья моренная равнина с краевыми ледниковыми образованиями; 14 – Могилевская водно-ледниково-моренная равнина; 15 – Костюковичская моренно-водно-ледниковая равнина. Характеристику типов инженерно-геологических условий развития водно-эрозионных процессов (1–6) см. в табл. 2.

и другие процессы. Значительная работа по преобразованию рельефа и грунтов приводит к осложнению инженерно-геологической обстановки в пределах краевых ледниковых возвышенностей, бортовых частей речных долин, котловин озер и крупных водохранилищ, а также территорий населенных пунктов и крупных строительных площадок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Делювиальный смыв и аккумуляция – эрозия и аккумуляция временных русловых потоков, как звенья единого водно-эрозионно-аккумулятивного цикла, являются осложняющим фактором инженерно-геологических условий отдельных территорий Белоруссии, особенно в пределах интенсивного инженерно-хозяйственного освоения.

Результаты их влияния на инженерно-геологические условия территорий можно представить следующим образом.

1. Эрозия и нарушение целостности грунтовых толщ поверхностными плоскостными и временными русловыми потоками, транспортировка и вынос разрушенного материала с последующей аккумуляцией в виде делювиальных присклоновых шлейфов и конусов выноса, сложенных делювиальными и пролювиальными отложениями.

2. Формирование комплекса форм выработанного и аккумулятивного рельефа территории (ручейковая сеть, промоины, овраги, балки, конусы выноса, делювиальные шлейфы и т.д.), изменяющего структуру распределения поверхностного стока и гидрологический режим малых водосборов.

Таблица 2. Типизация инженерно-геологических условий развития водно-эрозионных процессов на территории Белоруссии

Тип	Длина склонов, км	Крутизна склонов, град.	Глубина расчленения, м/км ²	Допустимые неразмывающие скорости поверхностных отложений, м/с	Тип грунтовой толщи	Модуль среднегодового поверхностного стока, л/с×км ²	Распаханность, %	Величина смыва, мм/год	Густота форм линейной эрозии, км/10 км ²	Плотность форм линейной эрозии, шт/10 км ²
1	0.20–0.28	2.0	7.5	0.42	Дисперсный, однородный	5.6	30	0.08	0.4	2–4
2	0.35–0.40	2.5	12.5	0.75	Тот же	6.9	35	0.12	0.45	8–12
3	0.44–0.50	3.5	15.0	0.55	- « -	6.3	35	0.52	0.5	19–20
4	0.52–0.54	4.5	20.0	0.60	- « -	6.5	40	1.6	0.65	25–40
5	0.40–0.55	4.5–5.5	25.0	0.65	Дисперсный, двухпородный	6.6	45	3.2	0.75	44
6	0.44–0.60	5.0–6.0	30.0	0.71	Тот же	6.7	45	>4	0.9	>50

3. Подготовка склоновых поверхностей различных эрозионных форм к развитию на них гравитационных склоновых процессов в виде различных видов оползней, в зависимости от типа грунтовой толщи (однородный, двухпородный).

4. Рост масштабов проявления водно-эрозионно-аккумулятивных процессов и усложнение инженерно-геологических и инженерно-геоморфологических условий на территориях интенсивного хозяйственного освоения.

Изучение особенностей формирования инженерно-геологических условий под влиянием водно-эрозионных процессов имеет важное практическое значение и может использоваться по целому ряду прикладных направлений — в строительстве гидротехнических и линейных сооружений, градостроительстве, сельском хозяйстве, мелиорации и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Болдышев Б.С., Жилко В.В.* Развитие овражной эрозии на территории Белоруссии // Проблемы изучения экзогенных геологических процессов. Минск: БелНИГРИ, 1980. С. 64–69.
2. *Болдышев В.С., Жилко В.В.* Основные закономерности развития линейной эрозии на территории Новогрудской возвышенности и Оршано-Могилевского плато // Почвоведение и агрохимия. 1975. Вып.12. С. 30–37.
3. *Галкин А.Н., Красовская И.А., Павловский А.И., Косинова И.И.* Инженерная геоморфология. Витебск: ВГУ имени П. М. Машерова, 2022. 256 с.
4. *Галкин А.Н., Матвеев А.В., Павловский А.И., Санько А.Ф.* Инженерная геология Беларуси. В 3 ч. Ч. 2. Инженерная геодинамика Беларуси / Под ред. В.А. Королёва. Витебск: ВГУ им. П.М. Машерова, 2017. 452 с.
5. Динамическая геоморфология / Под ред. Г.С. Ананьева, Ю.Г. Симонова, А.И. Спиридонова. М.: Изд-во МГУ, 1992. 448 с.
6. *Жилко В.В.* О потенциальной опасности развития эрозии почв в различных районах Белоруссии // Изв. АН БССР. Сер. с/х наук. 1974. № 4. С.43–48.
7. *Колпашников Г.А.* Инженерная геология. Минск: Технопринт, 2005. 132 с.
8. *Колпашников Г.А.* Особенности развития экзогенных геологических процессов в пределах ледниковой формации северо-западной части Русской равнины // Проблемы изучения экзогенных геологических процессов. Минск: БелНИГРИ, 1980. С. 26–36.
9. *Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Сущенко Ф.В.* Основы гидроморфологической теории руслового процесса. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 272 с.
10. *Лепешев А.А.* Овражная эрозия Новогрудской возвышенности и меры борьбы с ней: автореф. дис. канд. с/х наук. Минск, 1969. 23 с.
11. *Лепешев А.А., Кадацкий В.Б., Кучерова Е.В.* Овражная эрозия почв в Беларуси // Географія. Праблемы выкладання. 2014. № 5. С. 3–7.
12. *Маккаев Н.И.* Основные модели развития рельефа // Геоморфология. 1986. № 3. С. 6–15
13. *Маккаев Н.И.* Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 346 с.
14. *Маккаев Н.И., Чалов Р.С.* Русловые процессы. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. 263 с.
15. *Матвеев А.В., Нечипоренко Л.А.* Особенности проявления и взаимодействия современных геологических процессов на территории Беларуси // Веснік Брэсц. ун-та. Сер. 5. Хімія. Біялогія. Навукі аб Зямлі. 2011. № 1. С. 91-99.
16. *Матвеев А.В., Нечипоренко Л.А.* Последствия проявления опасных геологических процессов на территории Беларуси // Природопользование. 2016. Вып. 29. С. 30-37.

17. *Матвеев А.В., Нечипоренко Л.А., Павловский А.И. и др.* Современная динамика рельефа Белоруссии. Минск: Навука і тэхніка, 1991. 102 с.
18. *Матвеев А.В., Павловский А.И.* Плоскостная эрозия на территории Белоруссии // Закономерности проявления эрозионных и русловых процессов в различных природных условиях. М.: Изд-во МГУ, 1987. С. 129.
19. *Матвеев А.В., Павловский А.И.* Современные рельефообразующие процессы на территории Мозырской гряды // Докл. АН БССР. 1987. Т. 31. № 4. С. 347–350.
20. *Матвеев А.В., Павловский А.И., Сачок Г.И.* Типизация и районирование территории БССР по водно-эрозионным процессам // Буклет ВДНХ СССР. Минск: Наука и техника, 1988. 4 с.
21. *Моисеенко В.Ф., Павловский А.И.* Морфология овражно-балочных систем Мозырской гряды // Морфогенез на территории Белоруссии. Минск: Наука и техника, 1983. С. 56–64.
22. *Мотуз В.М.* Геоморфологические и гидрологические факторы развития водной эрозии на территории Белоруссии // Проблемы изучения экзогенных геологических процессов. Минск: БелНИГРИ, 1981. С. 70–79.
23. *Мотуз В.М.* Линейная (овражная) эрозия лессовых почвогрунтов Белоруссии // Эрозия почв и борьба с ней. Минск: Ураджай, 1968. С. 88–96.
24. *Павловский А.И.* Закономерности проявления эрозионных процессов на территории Беларуси. Минск: Навука і тэхніка, 1994. 102 с.
25. *Павловский А.И.* Морфологические особенности оврагов на территории Белоруссии // Современные рельефообразующие процессы. Минск: Наука и техника, 1986. С. 36–43.
26. *Павловский А.И.* Тоннельная эрозия на территории Мозырской гряды // Геологическое строение осадочной толщи Белоруссии. Минск: Наука и техника, 1985. С. 128–131.
27. *Павловский А.И., Галкин А.Н., Моляренко В.Л., Андрушко С.В.* Инженерно-геоморфологическая оценка экзогенной динамики рельефа Беларуси // Веснік Брэсц. ун-та. Сер. 5. Хімія. Біялогія. Навукі аб Зямлі. 2022. № 2. С. 24–34.
28. Эрозионно-русловые системы / Под ред. Р.С. Чалова, А.Ю. Сидорчука, В.Н. Голосова. М.: ИНФРА-М, 2017. 697 с.
29. *Харман Г.* Современный факторный анализ. М.: Статистика, 1972. 486 с.

FORMATION SPECIFICS OF ENGINEERING GEOLOGICAL CONDITIONS IN BELARUS UNDER THE INFLUENCE OF EROSION PROCESSES

A. I. Pavlovsky^{1,#}, A. N. Galkin^{2,##}, I. A. Krasovskaya², O. V. Shershnev^{3,###}

¹*Belarusian National Technical University, pr. Nezavisimosti 65, Minsk, 220013 Belarus*

²*Masherov Vitebsk State University, Moskovskii pr., 33, Vitebsk, 210038 Belarus*

³*Skorina Gomel State University, Sovetskaya ul., 104, Gomel, 246028 Belarus*

#E-mail: aipavlovsky@mail.ru

##E-mail: galkin-alexandr@yandex.ru

###E-mail: gomelgeo@yandex.ru

The article presents the results of a comprehensive study of the development conditions and features of water erosion manifestation in various natural and economic settings as an important condition of the formation of engineering geological features of the territory. The authors have established that the development, forms of manifestation and intensity of water erosion processes in the territory of Belarus, with all the diversity of natural and economic situations, are controlled by the energy potential of the relief, the basin structure of the territory and human economic activity. Engineering geological conditions were typified for the development of water erosion processes. The most complex engineering geological situations are observed within the marginal glacial uplands, which have a high energy potential of the topography, a two-rock type of ground massif, and a complex basin structure; as well as in areas of active economic development.

Keywords: *water-erosion-accumulation cycle, erosion, accumulation, rill network, temporary channel flows, ravines, colluvial washout, alluvial fan*

REFERENCES

1. Boldyshev, B.S., Zhilko, V.V. [Development of gully erosion on the territory of Belarus]. In: [Problems of studying exogenous geological processes]. Minsk, BelNIGRI Publ., 1980, pp. 64–69. (in Russian)
2. Boldyshev, V.S., Zhilko, V.V. [Basic patterns of development of linear erosion on the territory of the Novogrudok Upland and the Orshano-Mogilev Plateau]. *Pochvovedeniye i agrokhimiya*, 1975, issue 12, pp. 30–37. (in Russian)
3. Galkin, A.N., Krasovskaya, I.A., Pavlovsky, A.I., Kosinova, I.I. [Engineering geomorphology]. Vitebsk, Masherov VSU Publ., 2022, 256 p. (in Russian)
4. Galkin, A.N., Matveev, A.V., Pavlovsky, A.I., San'ko, A.F. [Engineering geology of Belarus. In 3 parts. Part 2. Engineering geodynamics of Belarus]. Korolev, V.A., Ed. Vitebsk, Masherov VSU Publ., 2017, 452 p. (in Russian)
5. [Dynamic geomorphology]. G.S. Anan'ev, Yu.G. Simonov, A.I. Spiridonov, Eds. Moscow, Moscow State University Publ., 1992, 448 p. (in Russian)
6. Zhilko, V.V. [On the potential hazard of soil erosion development in various regions of Belarus]. *Izvestiya AN BSSR. Seriya sel'skokhozyaystvennykh nauk*, 1974, no. 4, pp. 43–48. (in Russian)
7. Kolpashnikov, G.A. [Engineering geology]. Minsk, Tekhnoprint Publ., 2005, 132 p. (in Russian)

8. Koldashnikov, G.A. [Features of the development of exogenous geological processes within the glacial formation of the northwestern part of the Russian Plain]. In: [Problems of studying exogenous geological processes]. Minsk, BelNIGRI Publ., 1980, pp. 26–36. (in Russian)
9. Kondrat'ev, N.E., Popov, I.V., Snishchenko, F.V. [Fundamentals of the hydromorphological theory of channel process]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1982, 272 p. (in Russian)
10. Lepeshev A.A. [Gully erosion of the Novogrudok Upland and measures to control it]. Extended abstract of Cand. Sci. (Agricultural) diss., Minsk, Belarusian Research Institute of Agriculture, 1969, 23 p. (in Russian)
11. Lepeshev, A.A., Kadatskii, V.B., Kucherova, E.V. [Gully soil erosion in Belarus]. *Geografiya. Problemy vykladannya*, 2014, no. 5, pp. 3–7. (in Russian)
12. Makkaveyev, N.I. [Basic models of relief development]. *Geomorfologiya*, 1986, no. 3, pp. 6–15. (in Russian)
13. Makkaveyev, N.I. [River bed and erosion in its basin]. Moscow, USSR Academy of Sciences Publ., 1955, 346 p. (in Russian)
14. Makkaveyev, N.I., Chalov, R.S. [Channel processes]. Moscow, Moscow State University Publ., 1986, 263 p. (in Russian)
15. Matveev, A.V., Nechiporenko, L.A. [Peculiarities of manifestation and interaction of modern geological processes in the territory of Belarus]. *Vesník Brestskaga universiteta. Seriya 5, Khimíya. Bíyalogíya. Navukí ab Zyamlí*, 2011, no. 1, pp. 91–99. (in Russian)
16. Matveyev, A.V., Nechiporenko, L.A. [Consequences of the manifestation of hazardous geological processes in the territory of Belarus]. *Prirodopol'zovaniye*, 2016, issue 29, pp. 30–37. (in Russian)
17. Matveyev, A.V., Nechiporenko, L.A., Pavlovsky, A.I. et al. [Modern dynamics of the relief of Belarus]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1991, 102 p. (in Russian)
18. Matveyev, A.V., Pavlovsky, A.I. [Plane erosion on the territory of Belarus]. In: [Patterns of manifestation of erosion and channel processes in various natural conditions]. Moscow, Moscow State University Publ., 1987, p. 129. (in Russian)
19. Matveyev, A.V., Pavlovsky, A.I. [Modern relief-forming processes on the territory of the Mozyr ridge]. *Doklady AN BSSR*, 1987, vol. 31, no. 4, pp. 347–350. (in Russian)
20. Matveyev, A.V., Pavlovsky, A.I., Sachok, G.I. [Typification and zoning of the territory of the BSSR according to water erosion processes]. In: [Booklet of VDNKh USSR]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1988, 4 p. (in Russian)
21. Moiseyenko, V.F., Pavlovsky, A.I. [Morphology of gully-beam systems of the Mozyr ridge]. In: [Morphogenesis in the territory of Belarus]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1983, pp. 56–64. (in Russian)
22. Motuz, V.M. [Geomorphological and hydrological factors in the development of water erosion in the territory of Belarus]. In: [Problems of studying exogenous geological processes]. Minsk, BelNIGRI Publ., 1981, pp. 70–79. (in Russian)
23. Motuz, V.M. [Linear (gully) erosion of loess soils in Belarus]. In: [Soil erosion and its control]. Minsk, Uradzhai Publ., 1968, pp. 88–96. (in Russian)
24. Pavlovsky, A.I. [Morphological features of ravines in the territory of Belarus]. In: [Modern relief-forming processes]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1986, pp. 36–43. (in Russian)
25. Pavlovsky, A.I. [Patterns of manifestation of erosion processes in the territory of Belarus]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1994, 102 p. (in Russian)
26. Pavlovsky, A.I. [Tunnel erosion in the territory of the Mozyr ridge]. In: [Geological structure of the sedimentary strata of Belarus]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1985, pp. 128–131. (in Russian)
27. Pavlovsky, A.I., Galkin, A.N., Molyarenko, V.L., Andrushko, S.V. [Engineering geomorphological assessment of exogenous dynamics of the relief in Belarus]. *Vesník Brestskaga universiteta. Seriya 5, Khimíya. Bíyalogíya. Navukí ab Zyamlí*, 2022, no. 2, pp. 24–34. (in Russian)
28. [Erosion-channel systems]. R.S. Chalov, A.YU. Sidorchuk, V.N. Golosov, Eds. Moscow, INFRA-M Publ., 2017, 697 p. (in Russian)
29. Kharman, G. [Modern factor analysis]. Moscow, Statistika Publ., 1972, 486 p. (in Russian)