

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

**Кафедра инженерной геологии и геофизики**

АНАСОВИЧ Ольга Александровна

**СУФФОЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ НА ТЕРРИТОРИИ  
БЕЛАРУСИ**

Магистерская диссертация

специальность 1-51 80 04 «Общая и региональная геология»

Научный руководитель  
Санько Александр Федорович  
доктор геолого-минералогических наук

Допущена к защите

«\_\_»\_\_\_\_\_2017 г.

Зав. кафедрой инженерной геологии и геофизики

\_\_\_\_\_А.Ф. Санько

доктор геолого-минералогических наук, доцент

**Минск, 2017**

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Общая характеристика работы.....	2
Введение.....	6
Глава 1 Состояние изученности суффозии и суффозионного рельефообразования.....	8
1.1 История изучения суффозии и основные вопросы терминологии .....	8
1.2 Типы суффозионного процесса. Отображение суффозии в рельефе .....	10
Глава 2 Механизм, интенсивность и распространение суффозионных процессов .....	17
Глава 3 Проявление суффозионных процессов в лессовых массивах на территории Беларуси.....	26
3.1 Суффозионные формы рельефа.....	26
3. Отличия суффозионных процессов от пlyingунов, карстовых и термокарстовых процессов и их форм рельефа .....	29
Глава 4 Техногенная суффозия.....	32
4.1 Причины и виды техногенной суффозии .....	32
4.2 Прогнозирование суффозии и противосуффозионные мероприятия.....	37
Заключение.....	42
Список использованных источников.....	45

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Анасович О.А. Суффозионные процессы на территории Беларуси (магистерская диссертация). – Минск, 2017. – 47 с.

**СУФФОЗИОННЫЙ ПРОЦЕСС, ФАКТОРЫ РАЗВИТИЯ СУФФОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ, ФОРМЫ СУФФОЗИОННОГО РЕЛЬЕФА, ТЕХНОГЕННАЯ СУФФОЗИЯ.**

Цель работы – комплексное описание суффозионного процесса и ее проявлений на территории Республики Беларусь.

Объектом исследования являются природные и техногенные формы суффозионного рельефа.

Предмет исследования – суффозионные процессы на территории Республики Беларусь.

Написание магистерской диссертации основывалось на системном и комплексном научных подходах с использованием методов: анализа и синтеза, индукции и дедукции, классификации.

В процессе исследования были рассмотрены основные факторы и условия развития суффозионного процесса, формы суффозионного рельефа и их основные особенности, техногенный суффозионный процесс, методы прогнозирования и противосуффозионные мероприятия.

Результаты работы могут быть использованы в качестве основы для дальнейших детальных исследований суффозионных форм, анализа причин возникновения опасных суффозионных проявлений, проведении мероприятий по прогнозированию и противосуффозионных мероприятий.

Библиогр. 34 назв., 7 табл., 7 рис.

## АГУЛЬНАЯ ХАРАКТАРЫСТЫКА ПРАЦЫ

Анасовіч В.А. Суфазійныя працэсы на тэрыторыі Беларусі (магістэрская дысертацыя). – Мінск, 2017. – 47 с.

СУФАЗІЙНЫ ПРАЦЭС, ФАКТАРЫ РАЗВІЦЦА СУФАЗІЙНЫХ ПРАЦЭСАЎ, ФОРМЫ СУФАЗІЙНАГА РЭЛЬЕФУ, ТЭХНАГЕННАЯ СУФОЗІЯ.

Мэта работы комплекснае апісанне суфазійныя працэсы на тэрыторыі Рэспублікі Беларусь.

Аб'ектам даследавання з'яўляюцца суфазійныя працэсы і іх праяўленні на тэрыторыі Рэспублікі Беларусь.

Прадмет даследавання – прыродныя і тэхнагенныя формы суфазійнага рэльефу.

Напісанне магістарскай дысертацыі засноўвалася на сістэмным і комплексным навуковых падыходах з дапамогай метадаў: аналізу і сінтэзу, індукцыі і дэдукцыі, класіфікацыі.

У працэсе даследаванняў былі разгледжаны: асноўныя фактары і ўмовы развіцця суфазіённага працэсу, формы суфазійнага рэльефу і іх асноўныя асаблівасці, тэхнагенныя суфазійныя працэсы, метады прагназавання і супрацьсуфазійныя мерапрыемствы.

Вынікі работы могуць быць выкарыстаны ў якасці асновы для далейшых дэталёвых даследаванняў суфазійных формаў, аналізу прычын узнікнення небяспечных суфазійных праяўленняў, правядзенні мерапрыемстваў па прагназаванні і супрацьсуфазійных мерапрыемстваў.

Бібліягр. 34 назв., 7 табл., 7 рыс.

## GENERAL DESCRIPTION OF WORK

Anasovich O.A. Suffosion processes at the territory of Belarus (master's work). - Minsk, 2017. – 47 p.

SUFFOSION PROCESS, FACTORS OF THE DEVELOPMENT OF SUFFUSION PROCESSES, FORMS OF SUFFUSION RELIEF, TECHNOGENIC SUFFUSION.

The purpose of the work is comprehensive description of the suffusion process and its manifestations on the territory of the Republic of Belarus.

The object of research is the natural and technogenic forms of suffusion relief.

The subject of the research is suffosion processes on the territory of the Republic of Belarus.

The research thesis based on a systematic and integrated scientific approach, using methods: analysis and synthesis, induction and deduction, classification.

The study examined the main factors and conditions for the development of the suffusion processes, forms of the suffusion relief and their main features, technogenic suffusion process, methods of forecasting and antisuffosion activities.

The results can be used as a basis for further detailed studies of suffusion processes, analysis of the causes of the occurrence of the dangerous suffusion manifestations, conducting forecasting activities and antisuffusion measures.

Bibliography: 34 ref., 7 tabl., 7 fig.

## ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия в мире наблюдается тенденция возрастания ущерба от негативных воздействий суффозионных процессов. В первую очередь суффозионные проявления опасны для различных объектов, играющие важную роль в жизни человека. Так в Республике Беларусь все чаще стали проявляться суффозионные формы рельефа на территории городов, которые привели к аварийным ситуациям и нанесли крупный материальный ущерб (разрушение коммуникаций, поломки транспорта и спецтехники).

Несмотря на важность и актуальность данного вопроса, до сих пор не существует единой теории суффозионного процесса. Все чаще возникают трудности с установлением его роли и места среди других экзогенных геологических процессов. Отдельные виды суффозионного процесса являются сейчас предметом исследования разных направлений научной и инженерной деятельности, что не способствует правильному пониманию природы вещей и выработке грамотных решений. Также, несмотря на изученность отдельных проявлений суффозии на территории Беларуси, суффозии не были рассмотрены в целом, как единый геологический процесс.

В связи с этим, анализ имеющегося опыта, а также комплексное рассмотрение суффозионного процесса на территории Беларуси, является одной из важнейших задач на сегодняшний момент. Использование результатов данного исследования позволит улучшить понимание суффозии среди специалистов, поможет в проведении прогнозирования, а также в деятельности, направленной на противосуффозионную защиту.

Целью данной работы является комплексное описание суффозионного процесса и ее проявлений на территории Республики Беларусь.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

- Рассмотреть состояние изученности суффозии и суффозионного рельефообразования;
- Изучить механизмы возникновения, интенсивность и распространение суффозионных процессов на территории Беларуси;
- Изучить основные формы природной и техногенной суффозии на территории Беларуси, представить методы и способы прогнозирования и борьбы с суффозионными проявлениями.

В работе рассмотрены основные теории суффозионного процесса, факторы образования суффозионного рельефа, его основные формы на территории Республики Беларусь. Уделено внимание техногенной суффозии (в целом и на примере г. Минска), изучены причины и факторы ее возникновения, методы по предупреждению и прогнозированию возникновения опасных суффозионных

явлениях.

При написании работы была проанализирована и переработана имеющаяся литература по данной теме, среди которых следует отметить работы таких авторов как Хоменко В.П., Корсакова О.Н., Ломтадзе В.Д. [12, 15, 28]. При написании работы были использованы материалы периодических изданий, а также материалы новостных сводок о происшествиях, связанных с проявлением суффозии на территорию г. Минска.

Материалы, приведенные в данной работе, были представлены автором в ряде международных научных конференций: (“Актуальные вопросы наук о Земле в концепции устойчивого развития Беларуси и сопредельных государств”, Вторая Международная научно-практическая конференция студентов, магистрантов и аспирантов в г. Гомель 2016 г., “Геология в развивающемся мире”, Девятая Международная научно-практическая конференция студентов, магистрантов и аспирантов в г. Пермь 2016 г.) [2, 3].

# ГЛАВА 1

## СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ СУФФОЗИИ И СУФФОЗИОННОГО РЕЛЬЕФООБРАЗОВАНИЯ

### 1.1 История изучения суффозии и основные вопросы терминологии

Первым идею о влиянии подземных вод на формирования рельефа поверхности представил В.В. Докучаев в 1875 г [9]. Кроме него проблемой суффозии интересовали такие видные ученые-географы как Ф. Рихтхофен и У. Фиттон [9].

В 1898 г. на основании этих идей А.П. Павлов [21] ввел термин «подкапывание» или «суффозия», под которым подразумевалась особая совокупность геологических процессов и явлений, связанных с растворением и механическим разрушением дисперсных водопроницаемых пород подземными водами, следствием чего является вынос минерального вещества этих пород. Термин «суффозия» получил широкое распространение, однако в английском языке суффозию обозначают как «piping», а во французском – «renard». В начале XX века проблемой суффозии стал интересоваться С.С. Неуструев [11], однако видные ученые того времени (Л.С. Берг, П.А. Тутковский, А.Д. Нацкий [9]) не рассматривали суффозию как отдельный процесс и предпочитали относить его к карсту.

В настоящее время существует более 15 определений суффозии, которые отличаются по смыслу. Данная неопределенность связана в первую очередь с трудностями в изучении данного явления, а также отсутствием исследований, в полной мере описывающих данный процесс. Как правило, внимание уделяется лишь одной стороне явления суффозии: химической, механической суффозии либо противосуффозионным мероприятиям.

В 20-х годах XX века началось интенсивное изучение техногенной суффозии. Этим вопросом стали заниматься такие ученые как Н.Н. Павловский, В.С. Баумгарт и Р.Н. Давиденков, Е.А. Замарин, С.В. Избаш, Л.И. Козлова, Д.Д. Джастин, Р.Р. Чугаев, Н.М. Бочков и А.Н. Патрашев в СССР, У. Блай, К. Терцаги и Э. Лэйн в США, М. Херцог в Германии. В тоже время суффозия рассматривалась как природное явление. В этом направлении активно работали Е.В. Милановский, Д.И. Щербаков, К.И. Лисицын, И.С. Шукин, П.С. Макеев, А.С. Кесь, американские исследователи М. Фуллер, Т. Куэрк, К. Лэндс, немецкий географ А. Филипсон. Инженерная геология, полностью оформившаяся в 1930-х годах как новая наука, включила суффозию в число процессов, требующих изучения и практической оценки.

Активно велось изучение влияния суффозионных процессов для



сельскохозяйственного использования земель. В работах таких авторов как А.Г. Медведев, А.М. Абатуров, С.В. Безнуров, основное влияние уделялось изменениям почвенного покрова и почвенных процессов, вызванных суффозией.

Кроме этого изучением суффозии занимались и ученые-географы, которые рассматривали ее влияние на формирование отдельных природных комплексов. В их число входили: И.С. Щукин, Л.С. Берг и др [21].

После окончания второй мировой войны, с развитием новых технических средств исследования и методических приемов, изучение суффозии перешло на более высокий уровень. Независимо друг от друга в послевоенные годы усиленно изучались следующие виды суффозии:

1) карстово-суффозионное провалообразование, а также суффозионное провалообразование над полостями некарстового (в том числе, и искусственного) происхождения;

2) суффозионное разрушение заполнителя трещин и полостей;

3) суффозионное разрушение искусственных откосов и естественных склонов, включая суффозионное оползнеобразование, представление о котором было сформулировано еще в 1930-х годах в работах Ф.П. Саваренского и К. Терцаги;

4) «суффозионный псевдокарст»;

5) псевдовулканическая суффозия, интерес к которой проявился уже в начале прошлого века;

6) фильтрационное разрушение грунтов на объектах гидротехнического строительства: результаты этих исследований нашли отражение в нормативных документах и государственных стандартах ряда стран (в России и Германии);

7) химическая суффозия.

За более чем вековую историю изучения, подходы к рассмотрению суффозионных процессов получили развитие, претерпев ряд существенных изменений. Так, в начале XX века считалось, что появление суффозии вызвано выходом подземных вод на поверхность и образованием просадок. Однако исследования разных лет во многом опровергли данную концепцию. Подземные воды могут выражаться как фильтрационным потоком, так и сосредотачиваться в руслах. Кроме просадок, на поверхности могут образовываться и воронки, колодцы овраги, происходить оползни. Также были обнаружены подземные формы рельефа (пещеры, полости). В условиях затрудненного стока (лессовые породы) изменение массива не сопровождается выносом грунта.

Кроме рассмотрения суффозии как физического процесса, в конце XX века появились концепции, рассматривающие суффозию как сложный химико-механический и геоморфологический процесс. Под последним понимают

изменение физико-химико-механического состояния грунтовых масс под действием подземных вод, ведущего за собой образование поверхностных и подземных форм рельефа. Кроме того, каждое конкретное проявление суффозионного процесса стало рассматриваться как стадия более крупного явления: химическая суффозия (вынос и растворение химических соединений) – механическая суффозия (вынос частиц) – суффозия масс (разрушение массива пород) – суффозионная эрозия (формирование суффозионных форм рельефа).

Таким образом, понимание суффозии изменилось за свою вековую историю изучения. Вначале под суффозией понимали лишь механических процесс выноса пород и формирование в результате этого форм рельефа. Однако к началу XXI века, суффозию стали рассматривать как комплексный процесс, включающий в себя химическое, механическое изменение грунта, в результате формирующих различные формы поверхностного и подземного рельефа, оказывающих огромное влияние на хозяйственную деятельность человека.

## **1.2 Типы суффозионного процесса. Отображение суффозии в рельефе**

Суффозионные процессы объединяются в группы по следующим признаками: по характеру разрушения горных пород, по условиям выноса и перемещения разрушенных пород, по месту проявления.

Классифицируя суффозионный процесс по характеру разрушения горных пород, выделяют химическую и механическую суффозии.

К химической суффозии относят прямое фильтрационное растворение и выщелачивание простых солей (галоидов, сульфатов и карбонатов), которые содержатся в дисперсных и сцементированных породах в виде цемента или отдельного включения. В связи с тем, что процесс растворения и выщелачивания по-разному протекает в зависимости от характера горной породы, химическую суффозию принято разделять на трещинную и поровую.

Механическую суффозию делят на следующие группы: гидростатическое выдавливание слабопроницаемого заполнителя карстовых полостей и трещин, а так же на гидродинамическое разрушение, которое в свою очередь разделяется на размывание (подземную эрозию) и на фильтрационное разрушение. Кроме того, фильтрационное разрушение разделяют в зависимости от направления водного потока на нисходящее и восходящее.

Механическая суффозия представляет собой результат силового воздействия движущихся подземных вод на вмещающие их породы. Для протекания механической суффозии необходимо высокая поровая проницаемость горных пород, которую разделяют на полную и частичную.

Полное фильтрационное разрушение породы происходит тогда, когда в некотором объеме породы гидродинамическое давление превышает эффективное напряжение, и наблюдается переход грунта в псевдоплавучее состояние, в связи с ослаблением структурных связей. Частичное фильтрационное разрушение представляет собой вынос частиц из межзернового пространства несвязных пород.

Таким образом, каждый из видов суффозии, выделенных по характеру разрушения горных пород, протекает в породах определенного типа (таблица 1.1), которые можно назвать суффозионно неустойчивыми.

Таблица 1.1 – Суффозионно неустойчивые породы [26]

Вид суффозии			Тип горных пород		
Химическая	Трещинная		Скальные: обломочные, сцементированные растворимым цементом, трещиноватые		
	Поровая		Дисперсные	Связные и несвязные	Засоленные проницаемые
Механическая	Размывание				Любые
	Фильтрационное разрушение	Полное		Несвязные	Любые
		Частное	С бутовой текстурой		

В процессе суффозии гравитационная вода не только является агентом, разрушающим неустойчивые горные породы, но также выполняет работу по переносу продуктов разрушения. В результате, вынесенный минеральный материал заполняет поры кристаллизующимися простыми солями и мелкими нерастворимыми частицами, заполняя трещины и полости массы дисперсных пород. Ученые данное явление называют кольмотажем. В результате на поверхности земли наблюдается появление аккумулятивных форм рельефа.

При осуществлении транспортной функции, горные породы могут переноситься из одного места в другое. Транспортируемый материал либо аккумулируется в порах, трещинах и полостях горных пород, либо выносится на поверхность. Механизм и негативное влияние каждого из двух видов суффозионной аккумуляции будет значительно отличаться друг от друга. Ученые, в результате многочисленных наблюдений, предложили называть суффозионный вынос материала на земную поверхность внешней суффозией, а вынос в трещины и полости и перемещение внутри них – внутренней суффозией.

Существует несколько видов внешней суффозии. В одном случае наблюдается псевдовулканический характер переноса (фильтрационное разрушение восходящим потоком), в другом материал транспортируется вниз по склону или выносится к его подножью. Последний процесс принято называть присклоновой суффозией.

Внутренняя, или закрытая, суффозия имеет несколько отличающихся друг от друга видов переноса: в одном наблюдается перемещение заполнителя трещин и полостей во внутреннем пространстве породы, во втором – перемещение пород в ниже расположенные трещины и полости, которое в свою очередь имеет две разновидности, в зависимости от направление потока.

В таблице 1.2 представлен каждый тип суффозии, выделенный по условиям выноса и перемещения разрушенных горных пород, и зависящий от определенных особенностей геологической среды.

Суффозия во всех ее разновидностях вызывает изменение структуры горных пород или массивов, и способа проявиться на земной поверхности или под ее фундаментами зданий.

Суффозионные формы рельефа бывают поверхностными и подземными. Первые представляют собой отрицательные формы рельефа, вторые – структурные элементы массива горных пород. Такая классификация позволяет правильно подойти к изучению процесса суффозии, по-разному в каждом конкретном случае. Для определения границ поверхностных проявлений суффозионного процесса применяются аэрокосмические и топографо-геодезические методы, видеосъемки и фотосъемки, тогда как подземные суффозионные проявления могут быть обнаружены только при помощи специальных методов инженерно-геологических исследований.

Поверхностные проявления четко выражены в рельефе и сравнительно легко поддаются идентификации. В зависимости от строения земной поверхности они принимают различные формы и могут быть как аккумулятивными (конусы суффозионного выноса), так и деструктивными (поноры, провалы, оседания).

Таблица 1.2 – Условия, необходимые для выноса и перемещения пород, разрушенных суффозией [4]

Вид суффозии		Геолого-геоморфологическая обстановка, обеспечивающая суффозионный вынос		
		Характер рельефа земной поверхности	Структура массива горных пород	Гидрогеологические условия
Открытая (внешняя)	Присклоновая	Наличие склона	Любая	Разгрузка подземных вод в виде нисходящего источника
	Псевдовулканическая			Разгрузка подземных вод в виде восходящего источника
Закрытая (внутренняя)	Перемещение в трещины и полости пород, разрушенных восходящим потоком	Любой	Наличие незакольматированных трещин и полостей	Наличие вертикального восходящего потока подземных вод
	Перемещение в трещины и полости пород, разрушенных нисходящим потоком			Наличие вертикального нисходящего потока подземных вод
	Перемещение заполнителя внутри трещин и полостей		Наличие закольматированных трещин и полостей	Наличие нисходящего или горизонтального потока подземных вод

Выделяют два типа склоновых поверхностных проявлений суффозии. К первому относятся различные ниши, сопровождающиеся аккумулятивными формами в виде шлейфов и языков. Когда суффозионные ниши достигают крупных размеров, их начинают именовать суффозионными пещерами. Ко второму типу склоновых суффозионных проявлений относятся оползни,

которые развиваются, как правило, унаследовано на месте ниш.

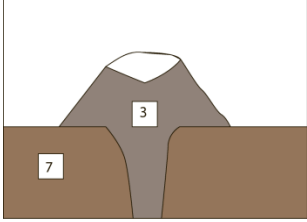
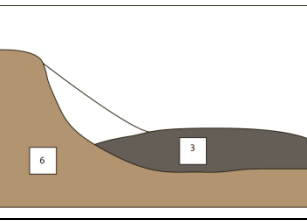
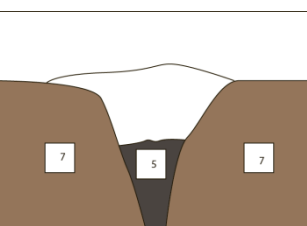
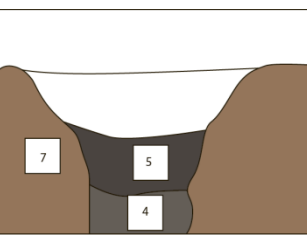
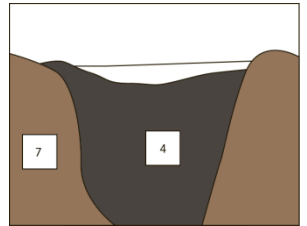
Суффозионные поноры образуются в результате подземной эрозии и встречаются в дисперсных или сцементированных обломочных породах. Наиболее типичные поверхностные проявления суффозионного процесса – оседания и провалы, представляющие собой замкнутые понижения земной поверхности округлой формы. Отличие между ними состоит в том, что оседания, как правило, не сопровождаются нарушением сплошности земной поверхности, а провалы всегда ограничены резким уступом и имеют форму обращенного вершиной вниз усеченного конуса. Коническая форма провалов универсальна, так как наиболее соответствует состоянию равновесия.

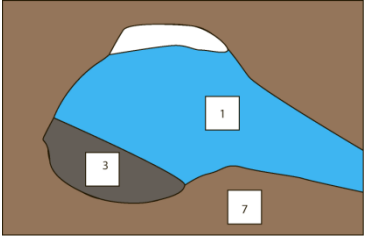
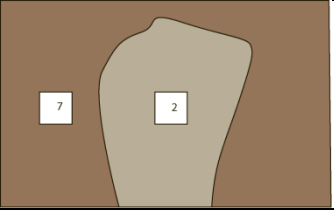
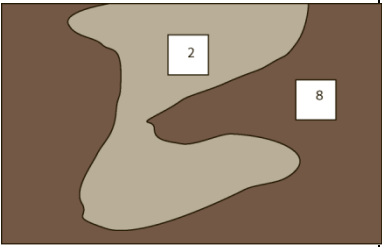
Подземные проявления представляют собой структурные элементы массива горных пород. Они подразделяются на четыре типа в зависимости от морфологических особенностей и происхождения (таблица 1.3). Под естественными полостями понимается замкнутое пространство в массиве горных пород, заполненное газом или жидкостью, либо тем и другим одновременно.

Следует отметить, что все приведенные в классификации проявления, связанные с химическими взаимодействиями, к собственно суффозии отношения не имеют [27].

Таким образом, можно утверждать, что существуют различные типы суффозионных проявлений, которые зависят от таких факторов как особенности грунтовых вод, тип слагающих пород и климатических условий.

Таблица 1.3 – Классификация суффозионных проявлений [4]

Виды суффозионных проявлений		Геологические процессы, формирующие данный вид суффозионных проявлений		
		Суффозионные		
		Выделяемые по характеру разрушения пород	Выделяемые по условиям перемещений разрушенных пород	
Поверхностные	Псевдовулканы		Механическая суффозия, кроме частичного фильтрационного разрушения	Псевдовулканическая суффозия
	Ниши и пещеры		Все	Присклоновая суффозия
	Оползни			
	Поноры		Химическая трещинная суффозия и подземная эрозия	Присклоновая суффозия и перемещение в трещины и полости пород, разрушенных нисходящим потоком
	Провалы		Механическая суффозия, кроме частичного фильтрационного разрушения	Все, кроме перемещения заполнителя внутри трещин и полостей
	Оседания		Все	

Виды суффозионных проявлений			Геологические процессы, формирующие данный вид суффозионных проявлений	
			Суффозионные	
			Выделяемые по характеру разрушения пород	Выделяемые по условиям перемещений разрушенных пород
Подземные	Полости		Все, кроме химической поровой суффозии и частичного фильтрационного разрушения	Все
	Псевдоплывуны		Полное фильтрационное разрушение	
	Зоны разуплотнения		Химическая поровая суффозия и частичное фильтрационное разрушение	Все, кроме перемещения в трещины и полости пород, разрушенных восходящим потоком
	Зоны дезинтеграции		Химическая трещинная суффозия	Все, кроме перемещения в трещины и полости пород, разрушенных восходящим потоком
<p>1 – вода; 2 – 5 – горные породы, испытавшие воздействие процессов: 2 – суффозионных, 3 – суффозионных и постсуффозионных, 4 – подземных постсуффозионных, 5 – склоновых постсуффозионных; 8 – горные породы, не испытавшие воздействие суффозионных и постсуффозионных процессов; 6 – дисперсные, 7 – дисперсные или скальные, 8 – скальные</p>				



## ГЛАВА 2

### МЕХАНИЗМ, ИНТЕНСИВНОСТЬ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ СУФФОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Существует множество подходов в изучении механизма возникновения и развития суффозионных процессов. В одних на формирование суффозии влияла совокупность факторов, включающие в себя особенности конкретной территории, структура горных пород и деятельность подземных вод, тогда как в других внимание акцентировалось лишь на одном явлении, определяя его как главенствующий фактор. В дальнейшем мы рассмотрим оба этих подхода.

В своей работе, Корсакова О.П. рассматривала механизмы происхождения суффозии на примере территории Беларуси [12, 14]. Так она выделила два больших комплекса факторов, обуславливающих развитие суффозионного процесса на территории нашей страны. Это пассивные и активные факторы.

К числу главных пассивных факторов, оказывающего влияние на распространение суффозионных процессов на территории Беларуси исследователи относят лессовые породы, их свойства и условия залегания.

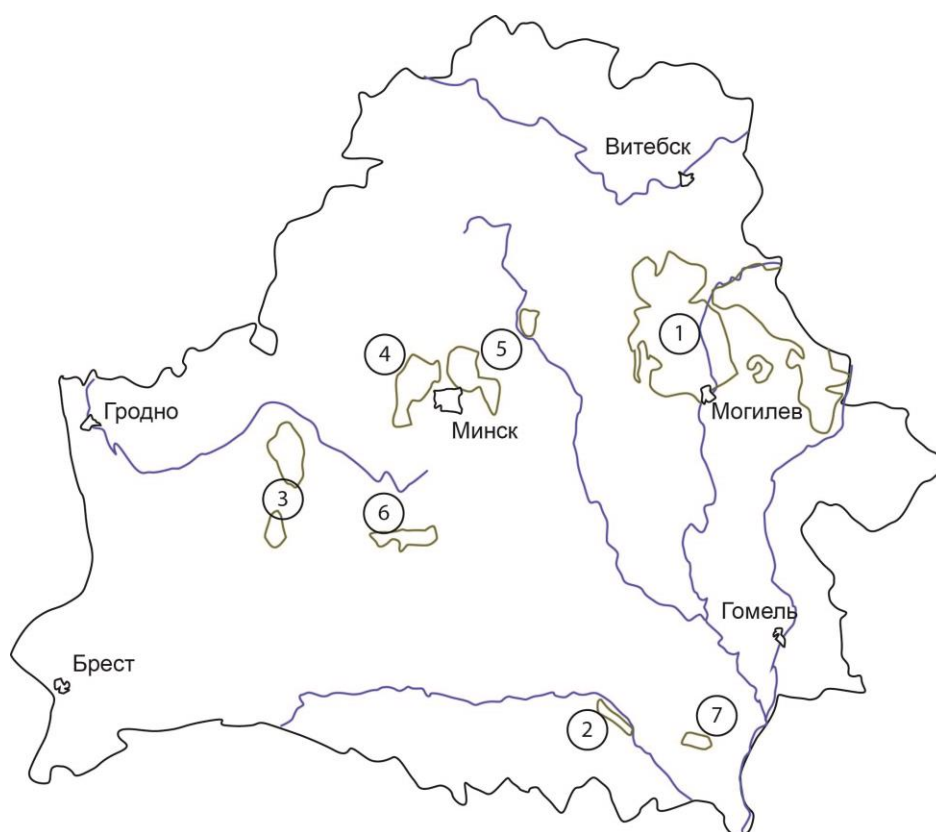
В пределах территории Беларуси выделяют семь районов, в которых распространены лессовые и лессовидные породы: Оршанско-Могилевский, Мозырский, Новогрудско-Кореличский, Минско-Дзержинский, Логойский, Слуцкий и Хойникско-Брагинский, при этом наибольшее развитие суффозионные процессы получили в первых трех районах, тогда как остальные районы характеризуются либо незначительной мощностью лессовых отложений, либо сильным влиянием хозяйственной деятельности (рисунок 2.1).

Ученые установили корреляцию между мощностью лессовых пород и суффозионными проявлениями. Так в пределах Оршано-Могилевского плато мощность отложений достигает 13 м, в пределах водоразделов. В основном, они залегают на морене сожского возраста. В пределах Новогрудско-Кореличского массива мощность достигает более 5 м в понижениях водоразделов [17].

Происхождение лессовых пород на территории Беларуси связано сразу с несколькими агентами (полигенетическое). По гранулометрическому составу преобладают легкие супеси и суглинки размером не превышающих 0,01 мм. Доля глинистых частиц не превышают 30%. Кварц и полевые шпаты являются основными породообразующими порода, при этом следует отметить содержание карбонатов в массиве (до 10%). По химическому составу лессовые породы Беларуси относятся к группе выщелоченных.

Грунтовые воды, которые залегают в лессовых породах, характеризуются повышенной минерализацией – 1,28 г/л. При этом воды, протекающие через слой флювиогляционных отложений, имеют заметно меньшую минерализацию, которая составляет 0,3-0,6 г/л. Этот факт как подтверждает, так и косвенно

характеризует химическую суффозию.



**Рисунок 2.1 – Суффозионные районы Беларуси [13]**

Условные обозначения: 1 – Оршано-Могилевский массив, 2 – Мозырский массив, 3 – Новогрудско-Кореличский массив, 4 – юг Минско-Дзержинский массив, 5 – Логойский массив, 6 – Слуцкий массив, 7 – Хойникско-Брагинский массив

Важной характеристикой лессовых пород является структура массива, которая вызвана различного рода физико-химическими связями между частицами в массиве грунта. Так под влиянием различного рода воздействий: электрических полей, порождаемых гравитационными, геомагнитными, электрическими и атомно-молекулярными силами, наблюдается ограничение в подвижности частиц, что является причиной низкой подвижности. Эти силы также обуславливают характер и степень взаимодействия горной породы и фильтрующей воды. Влажность оказывает влияние на прочность связи между частицами. Увеличение влажности приводит к изменению природы связи глинистых частиц (от которых зависит связь частиц в лессовых породах) от ионно-молекулярной к коагуляционной. Данные типы взаимодействия обуславливают наличие макроагрегатов в структурной схеме лессовых пород, что делает возможным появление суффозии массы.

Количественно водопроницаемость лессовых отложений можно охарактеризовать при помощи коэффициента фильтрации. Данный показатель

изменяется от 0,3 до 1,2 м/сутки. Водопроницаемость связана с рыхлым строением лессовых пород как на микро-, так и на макроуровнях. Исследования разных авторов показали, что главную роль в формировании водопроницаемости пород играют поры диаметром более 0,1 м. Наличие таких пор увеличивают водопроницаемость в вертикальном направлении в 2-10 раз по сравнению с горизонтальным. Такая анизотропность является условием развития механической суффозии и следующей за ней суффозии масс. Данная закономерность хорошо прослеживается на территории Оршано-Могилевского массива.

Кроме пористости на формирование суффозии высокую роль оказывают трещиноватость пород. Трещины имеют разную природу: набухания, усыхания, криогенные трещины, трещины оседания на склонах и др. При этом размер трещин может достигать нескольких сантиметров

К активным факторам, обуславливающим суффозионные процессы, относят грунтовые воды и их режим.

В лессовых и лессовидных породах вода может функционировать в нескольких формах: капиллярной, пленочной, свободной, парообразной, прочносвязанной и в виде льда. Для развития суффозии важным является наличие подвижной воды, к которой относят свободную, капиллярную и пленочную. Увлажнение массива лессовых пород различными формами подвижной воды нарушает структурные связи между частицами (переход от ионно-молекулярного к коагуляционному типу связи). Химический вынос растворимых компонентов породы осуществляется капиллярной и свободной водой, механическое перемещение мелких частиц – свободной, размыв грунтового массива имеет место при наличии свободной воды, образующей грунтовой поток по сосредоточенным руслам.

Кроме самого вида грунтовой воды, на формирование суффозии оказывает влияние ее режим, который формируется под влиянием климата, рельефа, геологического строения, растительности.

Данные полевых исследований свидетельствуют, что грунтовые воды в лессовых и лессовидных породах на территории Беларуси распространены в форме линз там, где они подстилаются более плотными отложениями сожского возраста. Сток талых вод приводит к образованию в пониженных местах водоносного горизонта, зеркало которого может достигать почвенного слоя. В связи со своим высоким залеганием (в среднем 5-8 метров), водоносный горизонт не связан с нижележащими водоносными породами.

Геоморфологические особенности территории оказывают влияние на характер фильтрации осадков вглубь массива, а также обуславливает эрозионные врезы, где в первую очередь может происходить формирование

суффозионных форм рельефа.

Согласно проведенным наблюдениям можно утверждать, что на склонах речных долин, в местах пересечения рельефа с крутыми короткими склонами, преобладает площадной сток [12]. В глубину влага попадает в период снеготаяния и ливней по грунтовым порам, трещинами и полостям. В таких условиях заметно повышаются шансы формирования подземных форм рельефа. Их образование связано с большой скоростью сформированных грунтовых потоков (до нескольких десятков метров в сутки). Такие воды уже не формируют водоносных горизонтов и зависят лишь от климатических условий конкретной территории.

На повышенных участках, для которых характерен пологоволнистый рельеф с небольшим колебанием относительных высот, условия фильтрации спокойные, просачивание воды идет неравномерно, сопровождаясь иссушением склонов и накоплением влаги в понижениях. В таких условиях формируются поверхностные формы рельефа.

В лесовых районах Беларуси геоморфологические условия затрудняют разгрузку грунтовых вод, что свойственно приводораздельным территориям. В таких районах на образование поверхностных форм суффозионного рельефа оказывает влияние действие инфильтрационного грунтового потока.

Важными факторами формирования суффозионного рельефа на территории лесовых массивов Беларуси также являются климатические условия, прежде всего режим атмосферных осадков. Так, отмечается закономерность, что на формирование понижений (западин, депрессий) оказывает влияние режим таяния снега. Подпитка грунтовых вод таявшим снегом вызывает изменение в водоносных горизонтах, которые оказывают влияние на перераспределение грунтового стока, и как следствие оказывает влияние на дальнейшее развитие суффозионных процессов на данной территории.

Через перераспределение площадного стока проявляется влияние растительности на режим грунтовых вод. Сведение леса и распахивание территории увеличивает количество влаги, достигающей поверхности земли. Грунт промачивается на большую глубину. Кроме того происходит усиление площадного стока, что способствует накоплению влаги в понижениях рельефа.

Таким образом, мощность и водопроницаемость пород, различные типы структурных связей, увлажнение, а также пористость и трещиноватость пород оказывают значительное влияние на деятельность суффозионных процессов и формирование суффозионного рельефа. Кроме того, на развитие суффозионных процессов и формирование суффозионных форм рельефа огромное влияние оказывают грунтовые воды и их характер, конкретные климатические особенности территории, а также ее освоенность (распаханность), которые

могут привести к усилению суффозионных процессов.

Во втором подходе к изучению причин возникновения суффозии значение имеет один главенствующий фактор. К этому фактору принято относить деятельность подземных вод.

Силовое воздействие гравитационной воды, которая свободно движется в обломочных породах и производит активную разрушительную работу, является основной причиной развития суффозионных процессов, исходя из данного подхода. В результате такого воздействия грунтовые массы теряют свою структурную прочность, что приводит к формированию в них ослабленных зон, в которых происходит формирование полостей, пор и трещин. Суффозия возникает лишь тогда, когда деятельность подземных вод приводит к разрушению структурных связей и изменению гранулометрического состава пород. При этом наблюдается образование свободного пространства, куда выносятся разрушенные породы или отдельные частицы. Для того чтобы начал развиваться суффозионный процесс, гравитационные воды должны обладать следующими характеристиками: начальная скорость фильтрационного потока, при которой может начаться вынос породы, критический градиент и т.д.

Такой подход при рассмотрении причин возникновения суффозии использовал Хоменко В.П. в своей классификации (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Причины возникновения суффозии [26]

Фактор, инициирующий суффозию	Процессы и воздействия, способные вызвать суффозию
1. Появление потока подземных вод в неводонасыщенных суффозионно неустойчивых породах	Затяжные дожди и сильные ливни. Бурное таяние снега и льда. Паводки и наводнения
2. Повышение агрессивности подземных вод по отношению к простым солям	
3. Увеличение скорости потока подземных вод	
4. Выход области суффозионного выноса на контакт с водонасыщенными суффозионно-неустойчивыми породами	Засухи. Обмеление водотоков и водоёмов Абразия. Речная и овражная эрозия. Обвальные и оползневые процессы. Провалообразование. Карст. Термокарст. Разрушение глинистых водоупоров над полостями. Жизнедеятельность организмов

В данной классификации на деятельность подземных вод оказывают влияние отдельные особенности горных пород: гранулометрический состав, трещиноватость.

В слабосвязанных грунтовых массах (глинистых) может наблюдаться ускоренное развитие выноса частиц подземными водами, которое осуществляется по трещинам, образующимся в результате процесса выветривания, или по ходам землеройных животных.

Наблюдается зависимость между минимальным градиентом фильтрационного потока от степени гранулометрической неоднородности породы: чем больше неоднородность, тем меньше критический градиент.

Также стоит отметить, что на развитие суффозионного процесса могут оказывать не только природные, но и техногенные процессы (таблица 2.2).

К числу различных процессов, деятельность которых приводит к формированию суффозионного рельефа, относят химическую суффозию и частичное фильтрационное разрушение пород, подземную эрозию, присклонную эрозию, фильтрационное разрушение восходящим потоком гравитационной воды и закрытое фильтрационное разрушение.

Химическая суффозия – это процесс переноса частиц и соединений подземными водами, который приводит к разуплотнению горных пород. Данное разуплотнение является одной из причин оползней, оседаний, которые могут вызывать деформацию зданий и сооружений.

Процесс подземной эрозии приводит к формированию таких форм рельефа как подземные каналы, которые могут достигать размеров пещер. Подземную эрозию, которая протекает в сцементированных обломочных, глинистых и лессовых породах часто называют кластокарстом, глинистым карстом и лессовым карстом, соответственно.

В ходе присклонной подземной эрозии суффозионный канал растет в длину и вширь, что приводит к обрушению его кровли, вплоть до образования провалов. Иногда там, где подземный канал раскрывается на склоне, образуется оползень. В дальнейшем на подземную может наложиться поверхностная эрозия, что приведет к формированию оврага.

Закрытая (внутренняя) подземная эрозия связана с появлением и ростом в суффозионно-неустойчивых (размываемых) породах не субгоризонтальных, а субвертикальных каналов. Они выполняют функцию водопоглощающих поноров и в верхней части могут принимать вид так называемых воронок просасывания. Обе разновидности подземной эрозии зачастую развиваются совместно.

Таблица 2.2. – Создание условий, необходимых для появления суффозии [26]

Подготовка суффозии	Процессы и воздействия, подготавливающие суффозию
Накопление суффозионно неустойчивых пород	Естественный литогенез
Дезинтеграция скальных пород	Тектонические движения. Выветривание. Карст
Засоление дисперсных пород	Затопление территории морскими водами. Привнос солей ветром и атмосферными осадками. Испарение высокоминерализованных грунтовых вод
Накопление нерастворимых частиц в порах и заполнителя в трещинах и полостях	Заиление дна водоёмов. Разложение органики. Выветривание. Карст
Образование трещин и каналов, не контактирующих с водонасыщенным суффозионно-неустойчивыми породами	Тектонические движения. Землетрясения. Разгрузка напряжений в бортах понижений рельефа. Оползнеобразование. Усадка глинистых пород. Просадка лёссовых пород. Морозобойное растрескивание. Выветривание. Жизнедеятельность организмов
Образование полостей, не контактирующих с водонасыщенными суффозионно-неустойчивыми породами	Карст. Вулканическая деятельность. Подземные пожары. Термокарст
Выход неводонасыщенных суффозионно-неустойчивых пород на земную поверхность	Абразия. Речная и овражная эрозия. Обвальные и оползневые процессы. Провалообразование

Фильтрационное разрушение горных пород может протекать в двух формах: плавной и резкой, различия которых проявляется на отдельных склонах и плоскостях.

Морфологическим признаком плавного протекания является устойчивая ниша, сформировавшаяся в водонепроницаемых породах, которая по мере развития процесса проникает внутрь склона. В дальнейшем может наблюдаться образование провалов, а также формирование уступа, при росте ниши вдоль

склона.

Результатом резкого протекания присклоновой эрозии являются оползни различных типов. Оползни суффозионного механизма представляют собой процесс циклического обваливания породы над постоянно возникающими суффозионными нишами. Оползни выплывания характеризуются мгновенным сносом водопроницаемых пород в форме “псевдоплывуна”. Причиной возникновения данного типа оползня может являться выход водонасыщенных пород на поверхность склона, вызванный разрушением слабопроницаемого слоя породы. Если склон перекрыт глинистыми накоплениями, они могут быть «срезаны» оползнями сдвига. Если же экран образовался вследствие сезонного промерзания водонасыщенных пород, его прорывы происходят под действием воды, поступившей из поврежденных участков породы.

При данном процессе часто наблюдается связь с поверхностной эрозией: с одной стороны формируется овражно-балочная система, с другой овражная эрозия является одним из факторов, вызывающих присклоновую фильтрацию породы.

Фильтрационное разрушение восходящим потоком (псевдовулканическая фильтрация) проявляется при разгрузке первого от поверхности водонапорного горизонта. В этом случае на поверхности земли формируется псевдовулкан. Под подошвой водоупора образуется полость, которая заполнена водой и вызывает прогиб и последующее разрушение с образованием псевдокольдеры.

Закрытая разновидность фильтрационного разрушения пород восходящим потоком может протекать и при отсутствии водоупора, отделяющего водопроницаемые породы от полости-приемника, при наличии в нем сквозного нарушения сплошности. Процесс начинается в результате появления в водопроницаемых породах восходящего потока. В неводонасыщенных породах он возникнет при поступлении в них воды снизу, а в водонасыщенных – при оттоке воды, например, вследствие водоотбора. В ходе процесса происходит циклическое формирование полостей, которые могут быть заполнены водой. Вторые возникают над первыми в результате обрушения кровли, а первые формируются на месте вторых после заполнения вытесненной водой. Процесс распространяется снизу вверх, при этом, если он достигнет земной поверхности, на ней появится провал, как результат обрушения, или оседание, как результат прогиба земных масс [7].

Закрытое фильтрационное разрушение нисходящим потоком протекает по-разному в зависимости от того, подвергаются ли разрушению водонасыщенные или неводонасыщенные породы.

В неводонасыщенных породах, перекрывающих открытую и обезвоженную полость-приемник, направленный в нее нисходящий



фильтрационный поток возникает при любых поступлениях воды извне. Его разрушительная работа проявляется в постоянном обрушении вновь возникающих незаполненных водой суффозионных полостей, которое может достигнуть земной поверхности.

Для закрытого фильтрационного разрушения нисходящим потоком водонасыщенных пород достаточно выхода незаполненной водой полостеприемника на контакт с породами, а если приемник заполнен водой, процесс инициируется ее оттоком или поступлением воды в вышележащие породы. Направленный в полость фильтрационный поток разрушает водонасыщенные породы, в которых появляется псевдоплавунная зона. После того, как ее верхняя точка достигнет подошвы слабопроницаемого слоя или свободной поверхности грунтовых вод, она будет расти только вширь, вызывая прогиб или обрушение вышележащих пород, вплоть до образования оседания или провала.

Закрытое фильтрационное разрушение пород нисходящим потоком связано с миграцией частиц, заполняющих трещины и полости. Часто наблюдается ситуация, когда заполнитель сам представляет собой продукт суффозионного выноса, а его разрушение является фактором, вызывающий такой вынос. В массиве скальных пород жесткая внутренняя поверхность трещины или полости ограничивает развитие этого вида закрытой суффозии. В случае выхода такой трещины или полости на склон, фильтрационное разрушение и вынос заполняющих ее пород способны сформировать нишу, и суффозионный процесс будет протекать по схеме присклоновой подземной эрозии, но без образования провалов или оползней [27, 30].

Рассмотренная классификация в полной мере описывает все возможные причины возникновения суффозионных процессов. Среди них следует выделить те, которые получили свое распространение на территории Беларуси. Это химический вынос пород, подземная и присклоновая эрозия. Остальные процессы слабо представлены на территории республики, в основном, из-за отсутствия соответствующих условий протекания процесса.

Таким образом, можно утверждать, что на развитие суффозионного процесса и формирование рельефа основное воздействие оказывает различная по направленности и интенсивности деятельность грунтовых вод, которая в зависимости от условий протекания, а также особенностей структуры слагающих пород может привести к образованию различных форм рельефа.

## ГЛАВА 3

# ПРОЯВЛЕНИЕ СУФФОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛЕССОВЫХ МАССИВАХ НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ

### 3.1 Суффозионные формы рельефа

На территории Беларуси выделяют два комплекса суффозионного рельефа. Подземные формы рельефа являются основными в комплексе суффозионных форм. При этом они тесно связаны с поверхностными формами. Основными агентами, деятельностью которых были созданы данные формы рельефа, являются водные потоки, сосредоточенные в руслах внутри массива породы. Эти комплексы связаны с эрозионными врезами – обрывистыми берегами рек, молодыми оврагами, карьерными выработками. Степень проявления эрозии напрямую зависит от глубины базиса эрозии, которая увеличивает разрушительную силу потоков. Также на мощность потока оказывают влияние большое количество осадков и режим стока. В условиях Беларуси такие комплексы сформировались на возвышенностях – Оршанской, Новогрудской и Мозырской [12].

Среди подземных форм выделяют: входные, транспортные и остаточные формы.

Поноры являются наиболее распространенной входной формой. Они занимают верхнее положение в комплексе подземных форм.

Воронки, колодцы и шахты относятся к числу объемных входных форм. При этом колодцы характеризуются отвесными стенками, а также своими размерами (глубина превышает диаметр). Поноры в колодцах занимают преимущественно боковое положение. Лессовым породам Беларуси не свойственны воронки и шахты и они встречаются достаточно редко.

Каждая из объемных входных форм может развиваться отдельно друг от друга, однако при развитии в комплексе, совместно друг с другом, первичной будет являться воронка, которая в будущем может перейти в форму колодца или шахты.

Характерной чертой суффозионного рельефа является формирование транспортных подземных форм, представленных тоннелями и пещерами. Развитие тоннелей происходит внутри массива по направлению падения поверхности склонов. На их присутствие указывают слепые обрывы, которые свидетельствуют о том, что ниже по направлению базиса эрозии осуществляется подземный сток. На поверхности тоннели обнаруживаются только в результате вскрытия их эрозионной формой (оврагом).

Пещеры развиваются в непосредственной близости к обрыву вдоль

крупных трещин. Своим происхождением они обязаны изменениям силы воздействия грунтового потока в наиболее ослабленных зонах. Они преимущественно имеют щелевидную форму. Причиной их появления является обрушение блока породы в стенках обрывов.

Суффозия, которая протекает по типу суффозионной эрозии, приводит к образованию остаточных форм рельефа, к которым относят останцы и арки. На территории Беларуси они образуются в условиях большой мощности лессовых пород.

Сложные комплексы подземного рельефа получили распространение в верховьях оврагов и на обрывах берегов рек. Их образование и деятельность определяется режимом и количеством атмосферных осадков. При этом часто образование новых подземных форм вызвано одним погодным явлением (ливнем).

Вторым комплексом суффозионного рельефа является комплекс, состоящий исключительно из поверхностных форм, которые образуются в результате химико-механической суффозии или суффозии масс. Морфология поверхностных форм связана с деятельностью ламинарных грунтовых потоков. При этом сток отсутствует. Этот комплекс привязан к низким отметкам водоразделов и характеризуется небольшим относительным превышением (вертикальное расчленение – до 10 м/км<sup>2</sup>, слабой расчлененностью, низким коэффициентом фильтрации (0,3-1,2 м/сутки).

Комплекс поверхностных форм рельефа представляет собой сочетание разного рода углублений и включает в себя западины, ложбины, депрессии и циркообразные ниши.

Самыми распространёнными формами этого комплекса являются западины. В пределах лессовых районов Беларуси они получили повсеместное распространение. Плотность их колеблется от 1-2 шт/км<sup>2</sup> до 100 шт/км<sup>2</sup>. Возраст западин не превышает 150 лет, что согласуется со временем интенсивного распаивания лессовой территории. Образование западин связано с изменением водного режима лессовых грунтов после сведения лесов и происходит в результате деформации породы, вызванной неравномерным распределением влаги, сопровождающегося иссушением склонов и переувлажнением пониженных участков.

Возраст западин определяется по мощность слоя торфа, накопившего в них. Так в пределах Горецкой и Могилевской равнин единично встречаются западины с мощностью торфа до 1,5 метров, что определяет их возраст в районе полторы тысячи лет.

Выделяются сырые, влажные и сухие западины. Однако основным критерием отличия западин является степень развития формы. Она

определяется условием увлажнения, а также перераспределением атмосферных осадков рельефом. Для западин характерна концентрическая форма. Морфологические части формы, такие как бровка, склон и подножие, выделяются при помощи почвенных разностей и растительности (для сырых и влажных западин).

Суффозионные ложбины в лессовых породах Беларуси встречаются крайне редко. Это вызвано преимущественно вертикальной фильтрацией влаги над горизонтальной. Образуются они при неглубоком залегании (до 7 м) грунтовых вод вблизи вскрытых эрозионных форм. В случае более глубокого залегания водоносного горизонта образуются депрессии, что связано с суффозией массы, в отличие от ложбин.

Циркообразные ниши имеют большее распространение на территории Беларуси. Их происхождение связано с процессом суффозии, которая достигла стадии подземного размыва в непосредственной близости к бортам эрозионных форм рельефа. Часто образование циркообразной суффозии связано с формированием трещин и оседанием блока породы.

Следует отметить связь между суффозией и процессами линейной эрозии, а также оползневыми и плоскостными смывами. При этом суффозия часто выступает стимулирующим фактором развития овражной эрозии.

В условиях пересеченного рельефа линейный размыв выступает естественным продолжением суффозионной эрозии. Расширение и рост туннелей приводит к обрушению сводов. При этом значительные участки вскрываются и переходят в открытые врезы. Объемные формы также формируют продольные ложбины, если наблюдается процесс их соединения (за счет увеличения размеров). В конечном итоге система подземного суффозионного рельефа переходит в серию оврагов. Такие формы рельефа ~~широко~~ распространены на Мозырской и Оршанской возвышенностях.

Гораздо реже суффозия выступает причиной возникновения оврагов. В данном случае суффозия выступает инициализатором процесса развития эрозионных форм по схеме промоина-рытвина-овраг-балка. При этом овраги в этом случае формируют суффозионные ложбины.

Основная роль суффозии в оползневых процессах заключается в выносе солей и мелких частиц, в результате чего происходит изменения связей в массиве пород, растворяются химические соединения, а также образуются оползни оплывания. Кроме того суффозия является причиной оползней проседания, образовавшихся в результате просадки поверхности над подземными пустотами и последующим отрывом блока породы.

Суффозионные оползни встречаются по бортам всех оврагов, берегам рек, на склонах балок.

Также суффозионные процессы оказывают влияние на плоскостной смыв: изменяют направление потока вещества и перераспределяют поверхностный сток на близлежащих территориях. В результате суффозия уменьшает размеры плоскостной эрозии.

### **3.2 Отличия суффозионных процессов от пlyingунов, карстовых и термокарстовых процессов и их форм рельефа**

Рассматривая суффозионные процессы, становится очевидным сходство данного явления с рядом других экзогенных процессов. Эта схожесть может проявляться как в механизмах формирования рельефа, так и во внешнем виде проявления процесса. Среди таких процессов можно выделить карст, термокарст и образование пlyingунов [20].

Пlyingуны – это насыщенные водой породы, способные растекаться или оплывать. Чаще всего к таким породам относятся пески разнообразного механического состава [1].

Основной причиной возникновения пlyingунов принято считать гидродинамическое давление, которое возникает при резком градиенте давления грунтовых вод. В состоянии пlyingуна разрушаются структурные связи в породе и частицы переходят во взвешенное положение.

Пlyingуны разделяются на ложные и истинные. К ложным пlyingунам относят породы, частицы которых не имеют структурных связей, в отличие от истинных пlyingунов, которые формируются в породах с коагуляционной или смешанной связью. Главное отличие этих двух видов состоит в способности породы отдавать воду: ложные пlyingуны легко отдают воду и при высыхании формируют рыхлую, слабо сцементированную массу, в то время как истинные плохо отдают воду и “пlyingут” в результате возникновения пленки физически связанной воды.

Как можно отметить в определении главным отличием пlyingунов от суффозионных форм явления является способность пlyingунов задерживать воду, а также отсутствие каких-либо видимых изменений в рельефе. В тоже время при формировании суффозии вода транспортирует слабосвязанные породы, формируя негативные формы рельефа (западины, воронки).

Пlyingуны получили широкое распространение на территории Беларуси и возникают, в основном, при строительных работах в насыщенных грунтовыми водами горных породах.

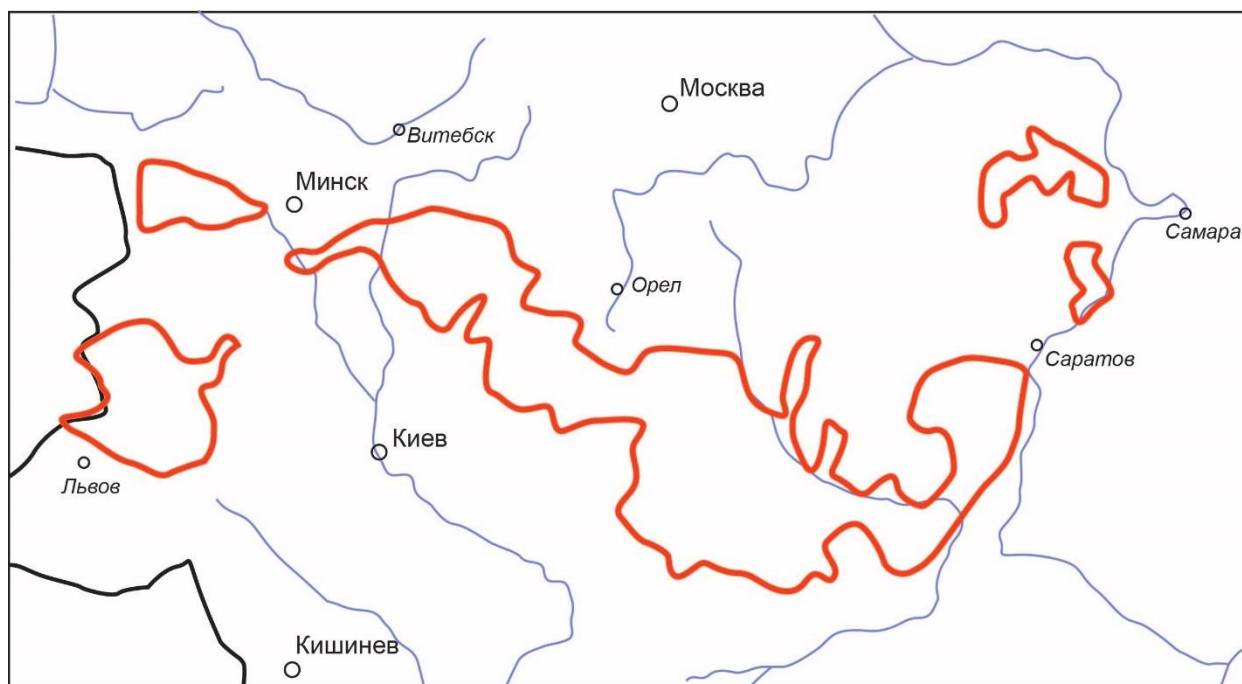
Под карстом понимают совокупность специфических форм рельефа и особенностей наземной и подземной гидрографии, свойственной некоторым областям, сложенным растворимыми горными породами, такими, как каменная

соль, гипс, известняк [24].

Сущность карстовых процессов заключается в растворении породы атмосферными, тальными, подземными или морскими водами. При этом необходимым условием формирования карста является наличие в воде растворенного  $\text{CO}_2$ . В результате вода становится чрезвычайно агрессивной и воздействует на породы. Кроме этого к основным условиям формирования карста относят рельеф, чистоту и мощность известковых пород, структуру породы, климат, трещиноватость породы.

Основные формы карстового рельефа принято разделять на две группы: голый и покрытый карст, причем голый свойственен горным областям, тогда как покрытый – равнинам. Наиболее распространенными формами рельефа, сформировавшихся в результате карстовых процессов, являются карры, карстовые воронки, колодцы, поля, пещеры и подземные ходы.

Территории Беларуси относятся к районам преимущественно покрытого карста, что вызвано присутствием покрывающих карстующие породы отложений. Во многом формирование карста связано с распространением меловых отложений (рисунок 3.1)



**Рисунок 3.1 – Распространение мела на территории Беларуси [17]**

Введение строительства объектов со значительными утечками воды или других агрессивных жидкостей, а также добыча полезных ископаемых, способствует формированию различных форм карстового рельефа, в первую

очередь провалов и оседаний [23].

Несмотря на схожесть форм рельефа, между суффозией и карстом имеются ряд кардинальных отличий. Главное из них это то, что карст возникает в результате химического растворения карстующихся пород, тогда как в процессе формирования суффозии частицы грунта вымываются подземными водами.

Термокарст имеет отличную от карста природу. При термокарсте также образуются различные провальные и просадочные формы рельефа, однако они связаны в первую очередь с таянием погребенного льда или протаиванием мерзлотных пород. Существуют различные по своим размерам формы термокарстового рельефа: от термокарстовых западин до котловин-аласов.

Термокарст получил свое распространение на территории республики Беларусь. Термокарстовые западины повсеместно встречаются в перегляциальной зоне поозерского оледенения.

К основному отличию термокарста от суффозии принято относить отсутствие влияния подземных вод в формировании западин. В термокарстовом процессе главным агентом, вызывающим перенос грунта является таяние древнего льда в толщах породы, в результате которого формируются полости различного размера и формируются области подверженные просадкам и оседаниям.

## ГЛАВА 4 ТЕХНОГЕННАЯ СУФФОЗИЯ

### 4.1 Причины и виды техногенной суффозии

В настоящее время наблюдается трансформация природной среды на территории городской застройки и объектов хозяйственной деятельности человека. Это во много раз повышает риск возникновения различных аварий и катастроф. В комплексе опасных геологических явлений суффозионные процессы занимают чрезвычайно важное место, в особенности на территории нашей климатической зоны (рисунок 4.1) [6].



**Рисунок 4.1 Проявление техногенной суффозии в пределах г. Минска,  
микрорайон Малиновка**

Суффозия на территориях хозяйственной деятельности человека (городские и промышленные застройки) носит ярко выраженный природно-техногенный характер (рисунок 4.2) . Развитие данного процесса, как правило, происходит без подготовки и практически мгновенно. Об этом свидетельствуют провалы и деформации земной поверхности.

Изучение причин возникновения техногенной суффозии являлось одним из главных направлений с начала XX века. Во многом это обеспечивалось прикладной направленностью науки: ученые в первую очередь занимались



изучением тех явлений и процессов, которые в той или иной степени влияли на хозяйственную деятельность. Техногенная суффозия оказывала свое влияние на промышленное строительство в 30-х годах 20 века, а также замедляла бурный рост сельского хозяйства.



**Рисунок 4.2 – Проявление опасных суффозионных явлений на территории г. Жлобина [25]**

Для начала развития суффозионного процесса необходимо достижение ряда определенных условий. Условия для формирования техногенной и природной суффозии различны, хотя приводят к аналогичным результатам. К таким условиям относятся: накопление суффозионно-неустойчивых пород, дезинтеграция скальных пород, засоление дисперсных пород, накопление нерастворимых частиц в порах и заполнителя в трещинах и полостях, образование трещин и каналов, не контактирующих с водонасыщенными суффозионно-неустойчивыми породами, образование полостей, не контактирующих с водонасыщенными суффозионно-неустойчивыми породами, выход неводонасыщенных суффозионно-неустойчивых пород на земную поверхность.

Одним из главных условий для формирования суффозии является накопление суффозионно-неустойчивых пород. В природной среде этот процесс происходит медленно в результате естественного литогенеза. В техногенной же к естественному литогенезу добавляется накопление культурного слоя, который

представляет собой слой земли, содержащий следы или остатки человеческой деятельности. Также накоплению неустойчивых пород способствует создание положительных форм рельефа в результате деятельности человека, которые не были укреплены в процессе строительства: образование грунтовых отвалов, насыпей, других земляных сооружений. Кроме того следует учитывать слой грунта, образовавшийся в результате плоскостного смыва.

В природе дезинтеграция скальных пород связана с выветриванием, карстом и тектоническими движениями. В техногенной среде данные процессы ускоряются за счет локальных взрывов (в районах добычи полезных ископаемых), а также в результате постоянного давления, оказываемого весом сооружений (просадка зданий).

Образование в дисперсных породах солевых соединений связано с постоянным орошением земель, а также с поступлением в грунты сточных и бытовых вод, в которых содержится большое количество агрессивных соединений.

Накопление нерастворимых частиц в порах в природе происходит за счет процессов переноса выветренного материала, а также переноса органического материала грунтовыми водами. В городах и на территории промышленных объектов, данный процесс во многом связан с переносом материала человеком: засыпка подземных пустот и выработок. Кроме того нерастворимые частицы накапливаются в результате искусственного кольматажа, тампонажа трещин и накопления остатков разрушающихся сооружений.

Также одним из факторов, приводящих к образованию техногенной суффозии, является деятельность человека, направленная на добычу полезных ископаемых. В ее результате формируется сеть подземных пустот, каналов, шахт, служащие в будущем средой, в которой и происходят суффозионные процессы (перемещение и накопление грунта, места обвалов породы и т.п.). Открытые же способы добычи полезных ископаемых (карьеры), а также места экскавации грунтов могут привести к выходу неводонасыщенных неустойчивых пород на земную поверхность.

Вышеперечисленные условия самостоятельно не могут вызвать появление суффозии. Необходимо воздействие других явлений, которые активируют суффозионный процесс. Такие явления, в свою очередь, также можно разделить на несколько групп.

Утечки из водонесущих коммуникаций и резервуаров, а также слив в грунты сточных и бытовых вод могут привести к формированию в последних гравитационных потоков, которые в свою очередь приведут неустойчивые породы к псевдоплавунному состоянию. Кроме того, сточные и бытовые воды характеризуются большой агрессивностью, что увеличит скорость процесса

разрушения структуры грунтов и дополнительно их ослабит. Чрезмерное орошение земель и внесение жидких удобрений ослабляет структурные связи в грунтах. Это вызывает плоскостной смыв либо проседание, которое приводит к разрушению почвенного покрова.

Кроме создания новых гравитационных потоков, вышеописанная хозяйственная деятельность может привести и к увеличению скорости уже имеющихся подземных вод. Данный процесс потенциально опасен также при условии длительной засухи, так как в такие периоды происходит накопление мелких нерастворимых частиц, которые с последующим увеличением скорости потока сильнее разрушают горные породы. Параллельно происходит и засоление пород, что также ослабляет стойкость грунтов. Вызвать засуху могут строительное водопонижение, осушение грунтов и земель (мелиорация), использование подземных вод, а также функционирование гидротехнических сооружений.

Последним фактором, который может служить причиной развития суффозионных процессов является выход области суффозионного выноса на контакт с водонасыщенными породами. В природе данное состояние вызывается абразией, речной и овражной эрозией, оползневыми процессами, карстом, разрушением водоупоров и жизнедеятельностью организмов. В районах хозяйственной деятельности человека такой же процесс может быть результатом разрушения берегов искусственных водоемов, экскавации грунта (при добыче полезных ископаемых либо строительстве), производства буровых работ и подземной горной выработки.

На территории города наиболее частыми проявлениями суффозионного процесса являются оползни (сползание склонов), а также оседание и провалы [14]. В основном, проявление суффозии наблюдается на склонах и берегах рек и оврагов, где имеются выходы подземных вод на поверхность. Также суффозионные провалы наблюдаются в местах аварии водопроводных и канализационных систем, когда вырвавшаяся вода формирует мощный поток (рисунок 4.3). В этом случае струйный размыв грунта приобретает катастрофический характер, сопровождаясь значительным разрушением грунтов и интенсивным выносом частиц.

Кроме этого, благоприятные условия способствующие протеканию суффозии создаются в процессе строительства и эксплуатации различных инженерных сооружений, когда осуществляется отсыпка песчаных и крупнообломочных пород на слабопроницаемые основания, перекапывание глинистых грунтов, создание поверхностей контакта грунта с различными искусственными материалами и многое другое. Суффозия, возникающая в грунтах отсыпки, зачастую приводит к деформациям тротуаров, лестниц [7, 9].



**Рисунок 4.3 – Проявление техногенной суффозии образовавшейся в результате прорыва водопроводной трубы [27]**

Анализируя архивную информацию на территории г. Минска следует отметить, что основными причинами образования провалов и осадок является выход из строя канализационных коммуникаций, а также осадка, вызванная сильными ливнями и продолжительными дождями [5]. При этом следует отметить, что появление провалов в связи с климатическими явлениями чаще всего коррелирует с расположением оврагов и рек, так как в этих местах наблюдается наиболее сильный перенос частиц грунта (в связи с уклоном и близостью водоносных горизонтов) (рисунок 4.4).



**Рисунок 4.4 – Суффозионно-опасные районы г. Минска**

## 4.2 Прогнозирование суффозии и противосуффозионные мероприятия

В связи с опасностью техногенной суффозии становится необходимым обеспечение и проведение противосуффозионных мероприятий, а также мероприятий, направленных на прогнозирование суффозионных процессов.

Для прогнозирования суффозионных процессов необходимым является наличие определенной исходной информации, которая делится на прямую и косвенную. К прямой относятся сведения о поверхностных или подземных суффозионных проявлениях, к косвенной – данные об условиях развития суффозии и факторах, которые привели к ее образованию. При этом следует отметить, что получение информации о подземной суффозии невозможно в полном объеме, тогда как информация о техногенных факторах сама представляет собой результат прогнозирования [25, 29].

Количественное прогнозирование проводится различными методами, которые обычно объединяются в пять групп: а) экстраполяция результатов стационарных наблюдений; б) методы, в основу которых заложены детерминированные математические модели; в) методы, базирующиеся на вероятностных моделях; г) физическое моделирование; д) методы аналогий. Также все эти методы могут применяться в различных сочетаниях.

Метод регионального экстраполяционного прогноза в настоящее время является одним из наиболее популярных.

Методы прогноза суффозии, которые основаны на использовании математических моделей, не предназначены в свою очередь для предсказания процесса в целом, а учитывают лишь определенные параметры конкретных проявлений или условий протекания генетических разновидностей. Такие модели были созданы с целью количественного прогнозирования условий и параметров суффозионного провалообразования, оползнеобразования, фильтрационного разрушения грунтов оснований гидротехнических сооружений, химической и псевдовулканической суффозии.

В последние годы в инженерной геодинамике широкое распространение получили вероятностные математические модели.

Кроме того, прогнозирование суффозии осуществляется при помощи физического моделирования, для которого широко используется натурный эксперимент, а также испытания созданных в полевых условиях крупномасштабных моделей.

Для прогноза суффозии полностью приемлем и метод натуральных аналогий, принципы которых универсальны, но он до сих пор не используется.

В последнее время наиболее популярными являются три методики

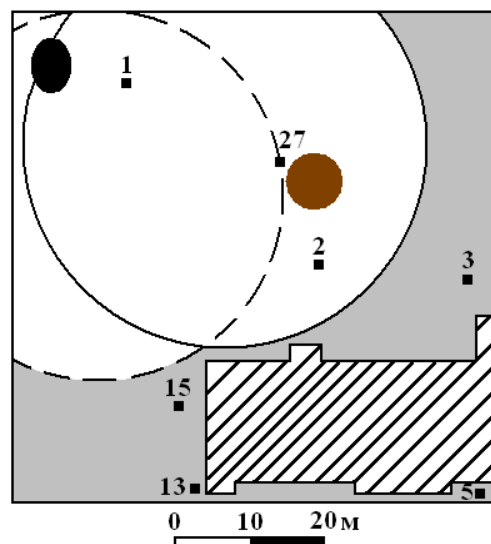
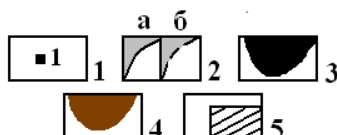
прогноза суффозионных процессов: модель обрушения дисперсных пород, модель закрытого фильтрационного разрушения нисходящим потоком, модель закрытого фильтрационного разрушения восходящим потоком [27].

Для повышения точности прогнозирования необходимым является знание о размещении и размерах суффозионных форм рельефа. Как и остальные инженерно-геологические прогнозы, он может быть представлен как в качественной, так и в количественной форме, который базируется на традиционных методах прогноза, получивших распространение в экзогеодинамике.

Важнейшей задачей при прогнозе развития суффозионного процесса является предсказание местоположения ожидаемого провала. Для этого целесообразным является использование информации, полученной в ходе динамического и статического испытания грунтов. Такие испытания позволяют оконтурить ослабленные зоны в грунтах, которые формируются вокруг возможных провалов (рисунок 4.5).

Статическое зондирование,  
выполненное в 1994 г.

№ точки	R*, МПа
1	8,9
2	6,3
3	15,1
5	13,5
13	13,5
15	14,6
27	5,1



**Рисунок 4.5 – Пример прогноза, осуществлённого с помощью метода определения местоположения ожидаемого провала (промышленная зона г. Дзержинска Нижегородской области, РФ) [30]:**

1 – точка статического зондирования и её номер; 2 – зона, внутри которой, согласно прогнозной идентификации её центральной части (а) и всей зоны (б), должен находиться центр провала в случае его образования; 3 – провал, образовавшийся в 1996 г.; 4 – старая провальная воронка; 5 – контур здания.

В ослабленных зонах наблюдаются следующие закономерности: во-первых, на одной и той же глубине сопротивление грунта проникновению конуса тем меньше, чем ближе к провалу расположена точка зондирования; во-



вторых, при характерном нарастании сопротивления грунта проникновению конуса с увеличением глубины зондирования градиент такого нарастания уменьшается по мере приближения точки зондирования к будущему провалу.

Исходя из этих предпосылок, было предложено определять место ожидаемого провала на основе анализа параметра удельного сопротивления грунта под конусом зонда или условного динамического сопротивления зонда соответственно при статическом или динамическом зондировании. Над будущим провалом значение параметра  $R^*$  – должно иметь минимальное значение [26].

Кроме численных методов прогноза суффозии успешно применяется лабораторное моделирование. В.П. Хоменко разработал установку для моделирования суффозионных и постсуффозионных процессов, в которой в качестве субстрата используется естественные горные породы или эквивалентные материалы, а качестве жидкости – любая жидкость, кроме сильных кислот.

Установка для моделирования представляет собой прямоугольный фильтрационный лоток, закрепленный на горизонтальной оси внутри жесткой рамы. Между рамой и лотком находится поворотное устройство, позволяющее переводить лоток в наклонное положение и обратно, с постепенным изменением угла наклона. Установка снабжена фоторегистратором, который может свободно перемещаться в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Конструкция установки обеспечивает моделирование различных суффозионных процессов: псевдовулканического, присклонового, закрытого суффозионного разрушения пород нисходящим и восходящим фильтрационными потоками, а также разрушения заполнителей трещин и полостей.

Соблюдение всех необходимых критериев подобия при моделировании суффозии в уменьшенном масштабе достигается за счет подбора свойств материалов моделей.

В связи с негативным влиянием на сферу человеческой деятельности становится необходимым проведение противосуффозионных мероприятий, направленных как на предотвращение, так и на уменьшение вреда от суффозионных проявлений.

Суффозия не может приводить к экологическому бедствию, однако она приводит определенный экологический ущерб. Он проявляется в виде нарушения естественных ландшафтов, порчи земель и питьевой воды, обмелению водоемов, образованию луж, гибели животных и растительности, стихийного формирования свалок.

Оценка суффозионной опасности для определенных видов строительства

или другой хозяйственной деятельности зависит от обнаружения признаков развития суффозии. При этом следует говорить об уже существующей или об ожидаемой суффозионной опасности.

Оценка существующей суффозионной опасности может производиться на основе имеющейся информации о поверхностных проявлениях суффозии (таблица 3.1.). Полученная информация является достоверной в том случае, когда прогноз устанавливает, по крайней мере, один из двух критериев: появление суффозии или суффозионной катастрофы.

Оценку существующей суффозионной опасности можно осуществлять на основе информации о поверхностных проявлениях суффозии (таблица 4.1) Оценка ожидаемой суффозионной опасности базируется на результатах прогнозирования. В результате прогноз позволяет установить факт либо появления суффозии, либо суффозионной катастрофы.

Таблица 4.1. – Количественные критерии оценки существующей суффозионной опасности для строительства объектов промышленного, гражданского и транспортного назначения [19]

Максимальный линейный размер поверхностного суффозионного проявления в плане (средняя величина), м	Интенсивность образования поверхностных суффозионных проявлений, случаев в год/км <sup>2</sup>				
	<0,01	0,01 – 0,05	0,05 – 0,1	0,1 – 1	>1
	Плотность поверхностных суффозионных проявлений, случаев/км <sup>2</sup>				
	<1	1 – 5	5 – 50	50 – 100	>100
<3	1				
3 – 10	2				
10 – 20	3				
>20	4				
1 – очень низкая опасность, не накладывающая ограничений на строительство; 2 – низкая опасность, требующая незначительного удорожания строительства; 3 – средняя опасность со значительным удорожанием строительства; 4 – высокая опасность, делающая строительство проблематичным.					

В результате прогнозирования и оценки опасности суффозионных процессов планируется проведения ряда мероприятий по защите сооружений.

Термин «противосуффозионная защита» употребляют довольно редко, однако такая защита существует и эффективно применяется в различных



ситуациях. Подобные мероприятия можно представить в систематизированном виде так, как это показано в таблице 3.2.

Таблица 4.2. – Классификация противосуффозионных мероприятий [10]

Типы защитных мероприятий		Содержание защитных мероприятий данного типа	Характер защиты	
			Профилактический	Оперативный
Пассивные	Архитектурно-планировочные	Безопасное размещение объектов на осваиваемой территории и выбор их формы в плане. Рациональная прокладка трасс линейных сооружений	+	-
	Конструктивные	Специальные конструкции фундаментов, в том числе, свайных. Рациональные конструктивные схемы зданий и сооружений	+	+
	Контролирующие	Контроль за состоянием грунтовой толщи в зоне её взаимодействия с объектом. Наблюдения за режимом подземных вод. Регистрация изменений земной поверхности и состояния склонов. Контроль за напряжённым состоянием и деформациями конструктивных элементов сооружений	+	+
Активные	Провоцирующие	Обводнение грунтов и создание в них фильтрационного потока. Динамические воздействия на грунты. Эскавация грунтов	+	-
	Предупреждающие	Проектные решения, исключающие возможность появления суффозионных и постсуффозионных процессов в результате эксплуатации объекта. Удаление суффозионно-неустойчивых грунтов из зоны их взаимодействия с объектом	+	-
	Управляющие	Снижение скорости движения подземных вод и их растворяющей способности с помощью искусственного обводнения или осушения грунтов, а так же путём регулировки работы гидротехнических сооружений и водозаборов подземных вод	-	+
	Препятствующее	Устройство противофильтрационных и гидравлических занавес, водонепроницаемых покрытий. Планировка рельефа и организация поверхностного стока. Каптаж источников подземных вод и устройство «обратных фильтров» в зоне их разгрузки. Тампонаж трещин и полостей. Закрепление грунтов и снижение их проницаемости	+	+

Мероприятия делятся на две группы: активные, которые оказывают непосредственное воздействие на факторы, инициализирующие суффозионные процессы, и пассивные, которые не оказывают такого воздействия.

Другим критерием разделения методов служит время проведения мероприятия: оно может быть профилактическим и оперативным. Первые осуществляются до начала суффозии или начала эксплуатации сооружения, вторые – во время взаимодействия процесса и сооружения. При этом само мероприятие оказывается значительно дороже.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы были изучены суффозионные процессы, рассмотрены формы их проявления, описаны факторы и условия, способствующие их образованию, а также изучен механизм их формирования. Кроме того рассмотрены основные формы техногенной суффозии, а также методы прогнозирования и противосуффозионных мероприятий.

Суффозия – разрушение и вынос потоком подземных вод отдельных компонентов и крупных масс дисперсных и сцементированных обломочных горных пород, в том числе слагающих структурные элементы скальных массивов. Изучение суффозионных процессов ведется с конца 19 века. В 30-е годы 20 века появились сразу несколько направлений изучений суффозии, которые до сегодняшнего дня остаются главными в исследовании данного процесса – это техногенные суффозии, механические суффозии, а также мероприятия противосуффозионной защиты.

За этот период времени сформировались основные направления исследований: ряд ученых рассматривают суффозию как чисто физико-механический процесс, в тоже время другая группа относит к суффозионным явлениям химическое и физико-химическое разрушение пород. Однако до сих пор не сложилось единого представления о сущности суффозии, а также причин и фактором ее возникновения.

В работе рассмотрены основные факторы, приводящие к возникновению суффозии. При этом, в связи с неопределенностью формулировки суффозии, а также отсутствием единого подхода к ее изучению сложились два крупных направления: в одном суффозию рассматривают как результат сложного взаимодействия равнозначных активных и пассивных факторов. К активным факторам относят деятельность подземных вод и особенности климата территории. К пассивным факторам – ряд особенностей горных пород: гранулометрический состав, тип связи между частицами, трещиноватость и пористость. При другом подходе к изучению суффозию считают результатом в первую очередь деятельности подземных вод на ослабленные грунты, тогда как остальные факторы рассматривались как второстепенные. Кроме того выделяют различные формы суффозионного процесса в зависимости от типа деятельности грунтовых вод. При рассмотрении каждой группы факторов в первую очередь учитывались особенности формирования суффозии на территории Беларуси.

В дальнейшем были изучены основные формы суффозионного рельефа на территории республики, а также закономерности их формирования и распространения. Было отмечено, что на территории Беларуси встречаются как подземные, так и поверхностные формы суффозии. Однако наибольшим

распространением характеризуются поверхностные формы. Кроме того был проведен сравнительный анализ суффозионных форм с другими схожими экзогенными процессами: карстом, термокарстом и образованием пльвунов.

В последней главе рассматривалась техногенная суффозия как одна из наиболее важных форм суффозионного процесса. Были описаны факторы и причины ее возникновения, а также проведены параллели между природной и техногенной суффозиями. Кроме этого были представлены способы и методы направленные на прогнозирование и предотвращение опасных суффозионных процессов. На основе этих факторов, а также архивных материалов были обнаружены закономерности проявления техногенной суффозии в г. Минске, которые были отображены на картосхеме опасных суффозионных процессов.

В результате автором была представлена общая теория о формировании природной и техногенной суффозии на территории республики Беларусь и приведены различные методы прогнозирования и противосуффозионных мероприятий.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ананьев, В.П. Инженерная геология: учебник для строительных спец. вузов / В.П. Ананьев, А.Д. Потапов. – Москва: Высшая школа, 2002. – 511 с.
2. Анасович, О.А. Суффозионные процессы и меры борьбы с ними / О.А. Анасович // «Актуальные вопросы наук о Земле в концепции устойчивого развития Беларуси и сопредельных государств»: сб. науч. труд. (по материалам II Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых) / Гомельский гос. ун-т; отв. ред. А.И. Павловский. – Гомель, 2016. – С. 363-365.
3. Анасович, О.А. Прогнозирование суффозии и противосуффозионные мероприятия / О.А. Анасович // Геология в развивающемся мире: сб. науч. тр. (по материалам IX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых): в 2 т. / Перм. гос. нац. исслед. ун-т; отв. ред. Р. Р. Гильмутдинов. – Пермь, 2016. – Т.1. – 541 с.
4. Бондарик, Г.К. Инженерная геодинамика: учебник / Г.К. Бондарик, В.В. Пендин, Л.А. Ярг. – Москва: КДУ, 2009. – 440 с.
5. Геоэкологические последствия просадочно-суффозионных процессов / Н.Г. Востриков, Е.В. Антошкина, Д.В. Максимов // Инженерный вестник Дона. – 2012. – №4. – С. 31-39.
6. Галкин, А.Н. Особенности проявления современных геологических процессов на территории Витебска / А.Н. Галкин, А.Д. Тимошкова, И.А. Красовская, А.Б. Торбенко // Литосфера. – 2007. – № 1 (26). – С. 73-77.
7. Трофимов В.Т. Грунтоведение / В.Т. Трофимов. – Москва: Издательство МГУ, 2005. – 1024 с.
8. Димухаметов, Д.М. Суффозионные процессы на территории городов / Д.М. Димухаметов, Л.А. Новопоселенских, Н.С. Бахарева // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2-2. – С. 892-892.
9. Докучаев, В.В. Картография русских почв: Объяснительный текст к почвенной карте Европейской России, изданной Департаментом земледелия и сельской промышленности / В.В. Докучаев. – Санкт-Петербург: Типография Киришбаума, 1879. – 114 с.
10. Золотарев, Г.С. Инженерная геодинамика / Г.С. Золотарев. – Москва: Издательство МГУ, 1983. – 120 с.
11. Инженерная геология: Учеб. для строит спец. вузов / В.П. Ананьев, А.Д. Потапов. – 3-е изд., перераб. и испр. – М.: Высш. шк., 2005.— 575 с
12. Корсакова, О.П. Рельефообразующая роль суффозионных процессов / О.П. Корсакова // Вопросы динамики рельефообразования процессов. – Москва, 1989. – С. 14-18.

13. Корсакова, О.П. Геоморфологическая роль суффозии в лессовых породах Белоруссии: Автореферат дис. канд. геогр. наук. / О.П. Корсакова. – Москва, 1990. – 18 с.
14. Корсакова, О.П. Геоморфологическая роль суффозии в лессовых породах Белоруссии / О.П. Корсакова. – Москва: МГУ им. М.В.Ломоносова, 1990. – 23 с.
15. Красовская И.А. Результаты комплексных инженерно-геологических исследований территории Витебска и его окрестностей: Ученые записки УО "ВГУ им. П.М. Машерова" / И.А. Красовская, А.Н. Галкин, П.А. Галкин. – Витебск, 2009. – Т. 8. – С. 299-314.
16. Ломтадзе, В.Д. Инженерная геология. Инженерная геодинамика: учебник для вузов по специальности «Гидрогеология и инженерная геология» / В.Д. Ломтадзе. – Ленинград: Недра, 1971. – 478 с.
17. Максимович, Г.А. Основы карстоведения / Г.А. Максимович. – Пермь, 1969. – 529 с.
18. Матвеев, А.В. Рельеф Белоруссии / А.В. Матвеев, Б.Н. Гурский, Р.И. Левицкая. – Минск, 1988. – 185 с.
19. Механика грунтов / А.А. Петраков. – Макеевка: Изд-во ДонНАСА, 2004. – 164 с.
20. Молоков, Л.А. Инженерно-геологические процессы / Л.А. Молоков. – Москва: Недра, 1985. – 260 с.
21. Опасные экзогенные процессы / В.И. Осипов, В.М. Кутепов. – Москва: ГЕОС, 1999. – 290 с.
22. Павлов, А.П. Морское дно / А.П. Павлов. – Санкт-Петербург: Типография И.Н. Скороходова, 1898. – 70 с.
23. Потапов, И.А. Зависимость суффозионной устойчивости песчаных грунтов различного генезиса от типа фильтрата / И.А. Потапов, А.А. Шименкова, А.Д. Потапов. – Москва: Вестник МГСУ, 2012. – №5. – С. 15
24. Потерухина, Д.С. Меловые отложения на территории Республики Беларусь / Д.С. Потерухина, Ю.Ч. Якубошко, М.И. Никитенко // Актуальные проблемы геотехники, экологии и защиты населения в чрезвычайных ситуациях: материалы 69-й студенческой научно-технической конференции, 25 апреля 2013 года. В 2 ч. Ч. 1. Среда обитания человека и ее изучение / БНТУ; под общ. ред. М.И. Никитенко. – Минск, 2013. – С. 54-58.
25. Проявление техногенной суффозии // Онлайнер [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: <https://auto.onliner.by/2014/02/19/proval-5> – Дата доступа: 01.06.2017.
26. Рычагов, Г.И. Общая геоморфология / Г.И. Рычагов. – Москва: Изд-во Московского ун-та: Наука, 2006. – 416 с.

27. Техногенная суффозия // Онлайнер [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: <http://www.gomelnews.onliner.by/2013/08/17/proval> – Дата доступа: 01.06.2017.

28. Хоменко, В.П. Карстовые и суффозионные провалы в г. Москве: особенности инженерно-геологических изысканий и прогнозирования / В.П. Хоменко, М.А. Калашников, И.А. Потапов. – Москва: Вестник МГСУ, 2010. – С. 4-2.

29. Хоменко, В.П. Закономерности и прогноз суффозионных процессов / В.П. Хоменко. – Москва: Геос, 2003. – 216 с.

30. Хоменко, В.П. Инженерно-геологическое изучение суффозионных процессов / В.П. Хоменко // Промышленное и гражданское строительство. – 2003. – № 10. – С. 13.

31. Хоменко, В.П. Исследования карстово-суффозионных процессов с целью прогноза развития их поверхностных проявлений: автореф. Дис канд. геол.-мин. наук /В.П. Хоменко. – Москва: ПНИИИС, 2003. – 22 с.

32. Хоменко, В.П. Карстово-суффозионные процессы и их прогноз / В.П. Хоменко. – Москва: Наука, 1986. – 97 с.

33. Хоменко, В.П. Негативные воздействия суффозии на объекты промышленного и гражданского строительства / В.П. Хоменко // Промышленное и гражданское строительство. – 2004. – № 10. – С. 10-11.

34. Хоменко, В.П. Суффозионные оползни и их опасность для строительства / В.П. Хоменко // Промышленное и гражданское строительство. – 2011. – № 11. – С. 11-13.