

На правах рукописи

Леонова Анна Владимировна

**ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
НА ТЕРРИТОРИИ Г. ТОМСКА**

Специальность 25.00.08 – «Инженерная геология, мерзлотоведение и  
грунтоведение»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Томск–2021

**Работа выполнена** в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

**Научный руководитель:**

**Строкова Людмила Александровна**, доктор геолого-минералогических наук, доцент, профессор Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета (г. Томск)

**Официальные оппоненты:**

**Козырева Елена Александровна**, доктор геолого-минералогических наук, доцент, заместитель директора по научной работе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (г. Иркутск)

**Ковалева Татьяна Геннадьевна**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, доцент кафедры «Динамической геологии и гидрогеологии» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет».

**Ведущая организация:**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе», МГРИ (г. Москва)**

**Защита диссертации состоится** «23» сентября 2021 г. в 14 час 00 мин на заседании диссертационного совета Пермского национального исследовательского политехнического университета Д ПНИПУ.03.10 по адресу 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский университет» (сайт <http://pstu.ru>)

Автореферат разослан      «    » \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д ПНИПУ.03.10  
кандидат технических наук, доцент

О.А. Маковецкий

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Интенсивная застройка г. Томска, происходившая особенно активно в последние десятилетия, а также специфика морфометрических и геологических условий территории обуславливают интенсификацию и активизацию опасных экзогенных геологических процессов (ОГП). Без учета динамики, механизмов, факторов и закономерностей развития опасных природных и техноприродных процессов, прогноза их развития, оценки опасности и риска невозможно качественное развитие территории. Высокая антропогенная нагрузка требует применения современных методов геоэкологического картирования, информационных систем для всестороннего изучения природных условий исследуемой территории, что впоследствии может послужить основой для прогноза их изменчивости и обоснования геоэкологической составляющей генерального плана города.

Изучение опасных геологических процессов не теряет актуальности на протяжении уже многих лет. Вопросам влияния природно-техногенных факторов на развитие ОГП посвящены многочисленные исследования отечественных и зарубежных ученых. Среди них важный вклад в изучение ОГП внесли Р.Э. Дашко, Г.А. Голодковская, О.П. Ермолаев, Г.С. Золотарев, И.П. Иванов, В.Д. Ломтадзе, Н.Н. Маслов, В.И. Осипов, А.Д. Потапов, В.М. Сергеев, В.Т. Трофимов, Г.Л. Фисенко и другие. Применительно к г. Томску данная проблема освещена в работах следующих авторов В.Е. Ольховатенко, В.М. Лазарева, Г.М. Рогова, М.Г. Рутмана, А.И. Полищука, И.С. Филимоновой, Г.Г. Щербака и других. По мнению В.А. Льготина, Ю.В. Макушина, Б.А. Егорова развитию и активизации экзогенных геологических процессов в г. Томске способствует увеличение техногенной нагрузки на геологическую среду.

**Целью работы** является комплексное исследование современных опасных геологических процессов и явлений в пределах городской территории, оценка факторов их развития, а также прогноз закономерностей распространения и вероятности их активизации.

### **Задачи исследований:**

1. Анализ условий и факторов развития опасных геологических процессов на территории г. Томска.
2. Оценка характера и возможных последствий воздействия подземных вод на физико-механические характеристики грунтов.
3. Оценка значимости основных факторов (геологических, гидрогеологических и геоморфологических) в устойчивости склонов моделированием.
4. Составление карт восприимчивости территории к ОГП.

**Исходные материалы и методика исследований.** В основу работы положены фактические материалы, собранные в ходе исследований, проводимых сотрудниками ТПУ, ОАО «Томскгеомониторинг», ОАО «ТомскТИСИЗ», материалы натурных и лабораторных исследований автора.

Исследование проводилось на базе теоретических представлений о механизмах развития геологических процессов, изучения факторов их

формирования, компьютерных технологий анализа пространственно-временных изменений параметров геологической среды и взаимообусловленности разнонаправленных процессов. Использован широкий спектр необходимых методических приемов, начиная с комплексного анализа и актуализации материалов, проведенных ранее инженерных изысканий, статистического анализа и натурного обследования, и заканчивая построениями картографических моделей с применением современных ГИС-технологий и моделирования.

В ходе работы автором выполнены:

- анализ условий и факторов развития опасных геологических процессов на территории г. Томска и синтез моделей, описывающих процессы;
- натурное обследование территории (в 2018, 2020 гг.);
- лабораторные исследования грунтов (2018, 2019 гг.);
- моделирование процесса развития геологических процессов с использованием ГИС-технологий.

**Методы**, использованные при написании работы:

- ГИС-технологии для построения карт;
- методы определения «веса» факторов ОГП: метод анализа иерархий – Analytic Hierarchy Process (АНП) и метод соотношения частотности – Frequency Ratio (метод FR);
- ROC-анализ для оценки качества модели-классификатора;
- Plaxis для расчета коэффициента устойчивости;
- Statistica, SPSS Statistics, Excel для анализа данных.

**Научная новизна работы:**

- уточнены закономерности формирования опасных геологических процессов на территории г. Томска, выявлены связи между гранулометрическим составом и влажностью глинистых грунтов и показателями их механических свойств;

• проведено моделирование развития оврагов и оползней; рассчитаны коэффициенты устойчивости склонов для разных типов фильтрационных разрезов, при разных глубинах залегания уровней подземных вод и при разной крутизне склонов;

• построены прогнозные карты восприимчивости геологической среды к развитию оврагов и оползней на основе проведенного ранжирования по степени влияния и определения «веса» каждого из факторов развития опасных геологических процессов на территории города.

**Основные защищаемые положения**

1. Проведенный корреляционный анализ позволил установить статистически значимые связи между гранулометрическим составом, физическими и прочностными свойствами глинистых грунтов, что необходимо учитывать при прогнозе развития опасных природных и техноприродных процессов, функциональном зонировании территории в целях устойчивого, экологически безопасного развития города Томска.

2. Оценка влияния антропогенного воздействия на устойчивость склонов на урбанизированных территориях заключающаяся в моделировании изменения устойчивости склона при расчетных изменениях прочностных свойств грунтов, рельефа и гидрогеологических условий территории, показала, что в условиях антропогенного подтопления коэффициент устойчивости склонов уменьшается, что отражается на эколого-геологических условиях урбанизированной территории города Томска. Для принятия обоснованных управленческих решений инженерной защиты необходимо осуществление мониторинга уровней подземных вод, а также исследование прочностных свойств грунтов, как при естественной влажности, так и с учётом их замачивания.

3. Методика инженерно-геологического районирования, заключающаяся в том, что вначале производится выбор и картографирование факторов, оказывающих влияние на развитие геологических процессов, затем, используя методы анализа иерархий и отношения частотностей выполняется определение веса каждого фактора, далее строятся карты восприимчивости территории к развитию опасных геологических процессов сложением тематических слоев с их собственным весом и последующим ранжированием, позволяет прогнозировать эволюцию геологической среды в масштабах города.

#### **Достоверность защищаемых положений, выводов и рекомендаций.**

Достоверность результатов и защищаемых положений, выводов и рекомендаций обеспечена анализом широкого круга научных работ по теме диссертации, использованием современных теоретических представлений о механизмах развития геологических процессов, современных апробированных методов и методик ГИС-технологий и моделирования, проверкой разработок натурными обследованиями, публикацией и апробацией основных выводов и рекомендаций.

**Практическая значимость работы.** Внедрение предложенной технологии может быть использовано для:

1. Контроля и оперативного управления состоянием геологической среды.
2. Оценки вероятности возникновения, масштабов и интенсивности нежелательных последствий антропогенного воздействия.
3. Обоснования управленческих и инженерных решений обеспечения комфортной экологически безопасной обстановки, принимаемых на различных уровнях, от разработки генерального плана до природоохранных мероприятий на конкретных участках городской территории.
4. Оценки стоимости земель городской территории.
5. Учебной работы при преподавании дисциплины «Инженерная геодинамика».

**Апробация работы.** Основные положения работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских научных и научно-технических конференциях и симпозиумах (5 работ), в 2005, 2009, 2014, 2016 и 2019 гг. Публикаций по теме диссертации – 11, из них 6 в журналах из перечня ВАК.

**Личный вклад автора.** Проведен анализ и обработка данных (более 300 проб); проведены лабораторные определения показателей механических свойств грунтов при разной влажности (более 10 испытаний); проведены расчеты

коэффициента устойчивости склонов при разных уровнях подземных вод и разной крутизне склонов (более 40 расчетов); с использованием ГИС-технологий выполнены картографические построения; интерпретированы результаты работы и сформулированы выводы.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Список литературных источников составляет 89 наименований. Общий объем работы 151 страница, включая 104 рисунка и 36 таблиц.

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна полученных результатов, защищаемые положения, практическая значимость работы.

**В первой главе** сделан обзор мирового и российского опыта изучения опасных геологических процессов; проанализирована изученность природных условий и экзогеодинамической обстановки г. Томска.

**Во второй главе** приведены краткие сведения о физико-географических, геологических, гидрогеологических условиях объекта исследований.

**В третьей главе** подробно охарактеризованы причины, условия и факторы развития геологических процессов на территории г. Томска.

**В четвертой** главе описаны методы расчета устойчивости склонов; проведены расчеты устойчивости для разных типов фильтрационных разрезов; разных глубин залегания подземных вод и склонов разной крутизны.

**В пятой** главе определена степень влияния факторов развития геологических процессов на территории г. Томска; представлены карты восприимчивости территории к оползням и оврагам, описана методика их построения и проведена верификация карт.

**В заключении** приведены основные выводы исследований.

**Благодарности.** Автор выражает благодарность за огромную помощь и поддержку при написании работы своему научному руководителю Л.А. Строковой, сотрудникам отделения геологии ТПУ Н.В. Гусевой, Е.М. Дутовой, В.В. Крамаренко, К.И. Кузеванову, А.Н. Никитенкову, Н.Н. Бракоренко, М.В. Козиной, Т.Я. Емельяновой, В.К. Попову, а также В.В. Кривошееву, Г.Б. Поспехову, Д.Л. Устюгову, Л.П. Норовой.

## **ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ**

### **Первое защищаемое положение**

*Проведенный корреляционный анализ позволил установить статистически значимые связи между гранулометрическим составом, физическими и прочностными свойствами глинистых грунтов, что необходимо учитывать при прогнозе развития опасных природных и техноприродных процессов, функциональном зонировании территории в целях устойчивого, экологически безопасного развития города Томска.*

Важнейшими факторами формирования природных условий территорий являются состояние и физико-механические свойства горных пород. Особенно важное значение изучение физико-механических свойств грунтов приобретает при расчетах осадок грунтовых толщ, оценке состояния и устойчивости геологической среды. В связи с этим одной из задач исследования является изучение влияния

гранулометрического состава и влажности на величины показателей физико-механических свойств грунтов.

Исследуемый участок, фактические данные по которому использовались в расчетах, расположен в восточной части г. Томска в жилом районе «Восточный». В инженерно-геологическом отношении территория данного района изучена достаточно хорошо. Ранее здесь проводились изыскания трестом инженерно-строительных изысканий (ОАО «ТомскГИСИЗ»).

В геоморфологическом отношении исследуемая площадь приурочена к окраинной части эрозионного склона Томь-Яйского междуречья. Рельеф местности полого-волнистый. Поверхность задернована. Абсолютные отметки поверхности территории изменяются от 165,85 до 174,81 м.

Геологический разрез характеризуется двухъярусным строением. Верхний ярус сложен рыхлыми образованиями MZ-KZ со стратиграфическим несогласием, перекрывающими палеозойский фундамент, представленный мел-палеогеновыми отложениями коры выветривания глинистых сланцев.

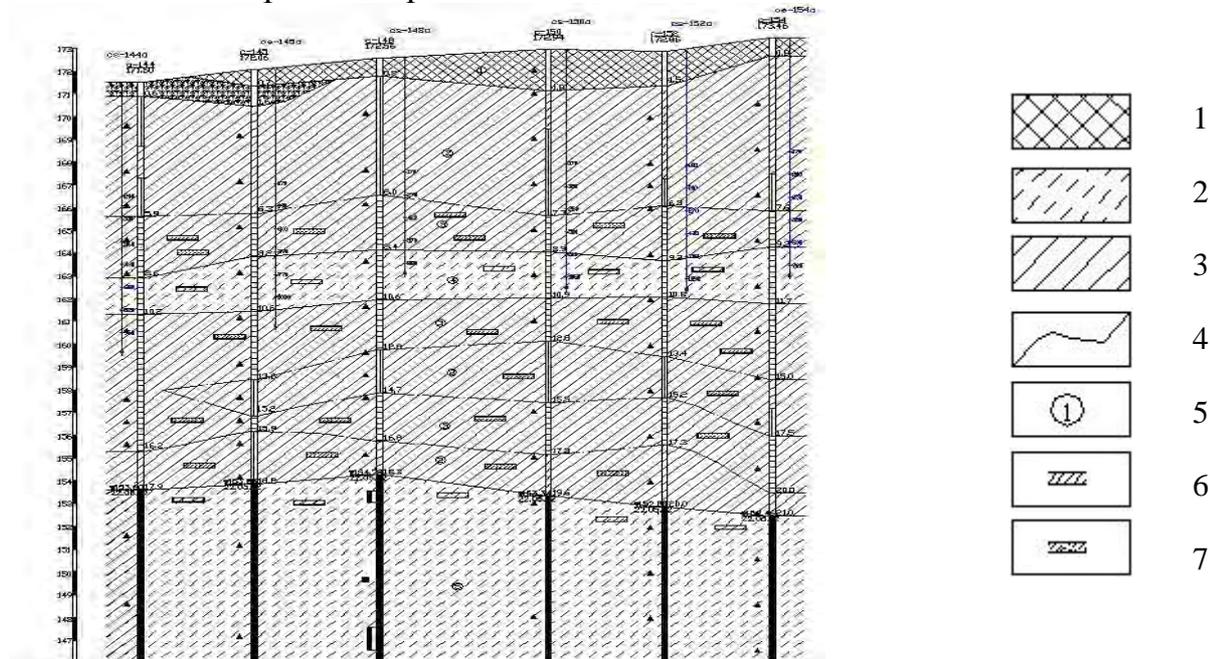


Рисунок 1 – Геологический разрез участка исследований:

1 – насыпной грунт; 2 – супесь; 3- суглинок; 4 – литологическая граница; 5 – номер инженерно-геологического элемента; 6 – прослой суглинка; 7 – прослой супеси

Рыхлая толща, сложенная преимущественно глинистыми породами, нивелирует собой неровности рельефа палеозойских пород. Мощность рыхлых отложений изменяется в пределах 20,8-29,3 м. Геолого-литологический разрез с поверхности до вскрытой глубины 25,0-27,0 м сложен ниже-средне-четвертичными отложениями водораздела (IaQ<sub>I-II</sub>), залегающими под почвенно-растительным слоем мощностью 0,2-0,7 м. Отложения представлены суглинками и супесями от твердой до текучей консистенции (рисунок 1). Ниже-среднечетвертичные суглинки встречаются на всей территории, имеют естественную влажность от 12,5 до 37,5%, сцепление от 0,13 до 0,71 кгс/см<sup>2</sup>, угол внутреннего трения от 14 до 27°. Супеси имеют естественную влажность от 5,6 до 26,1%, сцепление от 0,07 до 0,31 кгс/см<sup>2</sup>, угол внутреннего трения от 17 до 31°.

Обобщенные значения основных физических и физико-механических свойств грунтов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Показатели свойств грунтов

$\rho_s$ , г/см <sup>3</sup>	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\rho_d$ , г/см <sup>3</sup>	е, д.е.	W%	W <sub>L</sub> , %	W <sub>P</sub> , %	I <sub>p</sub> , %	S <sub>r</sub> , д.е.	φ, град.	C, кгс/см <sup>2</sup>	E, МПа
<u>минимальное - максимальное</u>											
среднее											
<b>суглинки</b>											
<u>2,55-2,74</u>	<u>1,32-2,13</u>	<u>0,96-1,83</u>	<u>0,48-1,66</u>	<u>12,5-37,5</u>	<u>21,5-46,1</u>	<u>14,2-32,7</u>	<u>7,1-17,0</u>	<u>0,58-1,11</u>	<u>4-27</u>	<u>0,13-0,71</u>	<u>16-156</u>
2,70	2,01	1,64	0,66	22,93	29,69	19,11	10,59	0,94	20,51	0,30	48,0
<b>супеси</b>											
<u>2,66-2,70</u>	<u>1,73-2,12</u>	<u>1,48-1,84</u>	<u>0,46-0,82</u>	<u>5,6-26,1</u>	<u>15,2-26,</u>	<u>12,5-20,3</u>	<u>2,2-6,9</u>	<u>0,33-1,05</u>	<u>7-31</u>	<u>0,07-0,31</u>	<u>24-160</u>
2,68	1,95	1,67	0,61	17,04	20,37	15,73	4,62	0,75	22,86	0,20	67,83

Для первоначального анализа и выявления факторов, оказывающих влияние на величину сцепления и угла внутреннего трения, использовался корреляционный анализ. Были определены зависимости сцепления и угла внутреннего трения от влажности и гранулометрического состава. Результаты представлены в таблицах 2,3.

Красным жирным шрифтом выделены коэффициенты корреляции, характеризующие устойчивые связи между показателями.

Таблица 2 – Результаты корреляционного анализа для суглинков

Показатели	Гранулометрический состав фракций, мм					Естественная влажность, %	Значение R <sup>2</sup>	t <sub>p</sub>	T <sub>табл</sub>
	0,50-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	0,05-0,005	<0,005				
Угол внутреннего трения, °	-0,19	0,08	-0,02	-0,12	-0,19	<b>-0,69</b>	0,5767	16,89	2,345
Сцепление, кгс/см <sup>2</sup>	0,28	0,14	0,01	-0,20	0,20	<b>-0,43</b>	0,639	19,27	

\*примечание: здесь и далее красным цветом выделены коэффициенты корреляции при уровне значимости  $\alpha < 0.05$ .

Как видно из таблицы 2, для суглинков наблюдается устойчивая корреляционная зависимость между углом внутреннего трения и сцеплением и естественной влажностью грунта

Таблица 3 – Результаты корреляционного анализа для супесей

Показатели	Гранулометрический состав фракций, мм					Естественная влажность, %	Значение R <sup>2</sup>	t <sub>p</sub>	T <sub>табл</sub>
	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	0,05-0,005	<0,005				
Угол внутреннего трения, градус	-0,25	0,18	<b>-0,51</b>	<b>0,45</b>	-0,22	<b>-0,87</b>	0,8171	23,62	2,358
Сцепление, кгс/см <sup>2</sup>	-0,21	0,02	<b>-0,38</b>	<b>0,46</b>	-0,15	<b>-0,89</b>	0,766	20,22	

Данные, приведенные в таблице 3, показывают значимые корреляционные взаимосвязи между такими параметрами супесей, как сцепление и угол

внутреннего трения и содержание фракций размером 0,05-0,005 и 0,1-0,05 мм и естественной влажностью.

Установлена явная зависимость между естественной влажностью грунтов, и величинами сцепления и угла внутреннего трения. В более наглядном виде основные закономерности, представленные в таблицах, можно рассмотреть в виде графиков (рисунки 2,3). Как видно из графиков, для суглинка прослеживается закономерное уменьшение сцепления и угла внутреннего трения с увеличением влажности. Из графиков видно, как изменяются сцепление и угол внутреннего трения супесей при изменении величины влажности (рисунки 4,5). Аппроксимирующие прямые изменяются обратно пропорционально, так при уменьшении естественной влажности супеси сцепление и угол внутреннего трения увеличиваются.

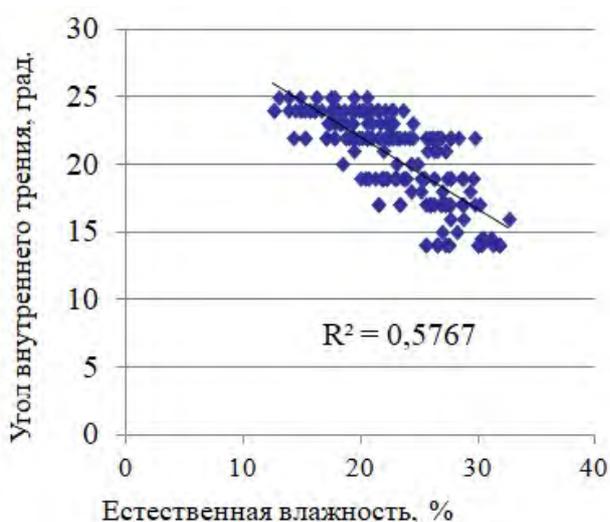


Рисунок 2 – Зависимость угла внутреннего трения суглинка от естественной влажности

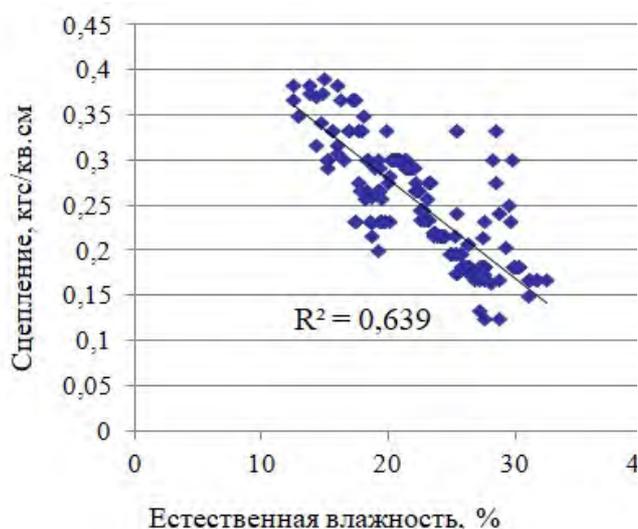


Рисунок 3 – Зависимость сцепления суглинка от естественной влажности

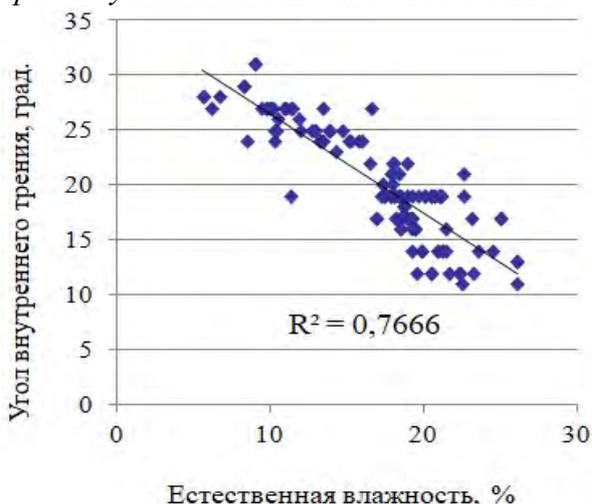


Рисунок 4 – Зависимость угла внутреннего трения супеси от естественной влажности

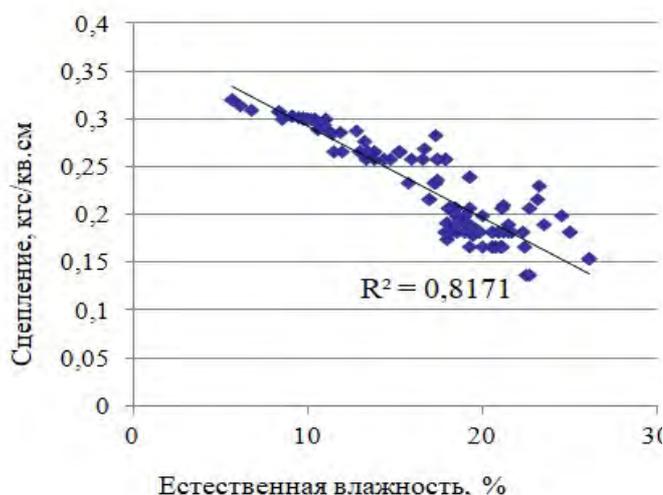


Рисунок 5 – Зависимость сцепления супеси от естественной влажности

В результате проведенной работы выявлены значимые корреляционные взаимосвязи между такими параметрами грунтов, как сцепление и угол внутреннего трения и содержанием некоторых фракций. Также для

рассмотренных грунтов установлена явная зависимость между естественной влажностью грунтов, а также величинами сцепления и угла внутреннего трения.

**Для суглинков:**

$$C=0,460-0,034 \cdot I_L-0,009 \cdot W$$

$$\varphi=28,332-6,520 \cdot I_L-6,827 \cdot e$$

**для супесей:**

$$C=-0,211+0,001 \cdot [\Phi_{0,05-0,005}]$$

$$\varphi=57,704-2,264 \cdot I_L$$

Выявленные закономерности предполагается в дальнейшем использовать при многофакторном пространственном анализе территорий и районировании по возможности развития опасных геологических процессов.

### **Второе защищаемое положение**

*Оценка влияния антропогенного воздействия на устойчивость склонов на урбанизированных территориях заключающаяся в моделировании изменения устойчивости склона при расчетных изменениях прочностных свойств грунтов, рельефа и гидрогеологических условий территории, показала, что в условиях антропогенного подтопления коэффициент устойчивости склонов уменьшается, что отражается на эколого-геологических условиях урбанизированной территории города Томска. Для принятия обоснованных управленческих решений инженерной защиты необходимо осуществление мониторинга уровней подземных вод, а также исследование прочностных свойств грунтов, как при естественной влажности, так и с учётом их замачивания.*

Как было сказано ранее, с изменением влажности меняются механические свойства грунта. Нами была поставлена задача проверить, как изменение механических свойств скажется на коэффициенте устойчивости оползнеопасного склона. Были рассчитаны коэффициенты устойчивости склонов на четырех ключевых участках г. Томска (по имеющимся фактическим данным), как в существовавших на момент изысканий условиях, так и с прогнозным повышением уровня грунтовых вод (в том числе, техногенных подземных вод).

При определении коэффициентов устойчивости склонов учитывались следующие факторы: свойства грунтов; уклоны склонов; типы фильтрационных разрезов, выделенные Кузевановым К.И. (1998г.)

*Фильтрационные разрезы (ФР).* Для расчетов коэффициента устойчивости склонов были выбраны территории, на которых развиты следующие типы фильтрационных разрезов: с высокой степенью потенциальной подтопляемости (ФР-III-1, ФР-II-1); с умеренной степенью потенциальной подтопляемости (ФР-I-2, Ф Р-II-2, Ф Р-III-2). Для участков Ф Р-II-2, где основание разреза хорошо дренировано и поэтому уровень подземных вод не поднимается, коэффициент устойчивости рассчитывался без учета возможности изменения уровня подземных вод. Для остальных участков расчет велся для разных уровней подземных вод.

*Уклоны склонов.* Как известно из многочисленных исследований, склоны становятся оползнеопасными уже при уклоне  $6^\circ$ . Для территории г. Томска составлена карта уклонов поверхности, по которой выбраны участки для расчетов устойчивости склонов. При проведении расчетов использовались данные по

показателям свойств грунтов разных фильтрационных разрезов. Расчеты проводились для уровня воды, существовавшего на момент изысканий и прогнозных уровней воды с учетом возможного техногенного подтопления территорий (табл. 4).

Таблица 4 – Значения коэффициентов устойчивости при разной глубине залегания уровня подземных вод в условиях разных фильтрационных разрезов

Тип фильтрационного разреза	Глубина залегания подземных вод, м	Коэффициент устойчивости ( $K_{уст}$ )
ФР-II-1	1	3,77
	2	4,58
	4	4,76
ФР-II-2	4	5,28
	5	5,39
	6	5,51
ФР-III-1	1	4,16
	2	5,14
	3	6,32
	4	6,47
ФР-III-2	6	3,56
	7	3,68
	8	3,94

### Влияние крутизны склонов на величину коэффициента устойчивости

Как известно, крутизна склонов оказывает существенное влияние на их устойчивость. Для ключевых участков с разными типами фильтрационных разрезов также были проведены расчеты коэффициента устойчивости склонов при изменении уклона поверхности до 10, 20 и 30°. Показатели физических и механических свойств оставались неизменными, как и положение уровня подземных вод. Изменялась только крутизна склонов (рисунки 6,7). Расчет производился по обобщенным показателям свойств, приведенным в таблице 5.

Таблица 5 – Исходные данные для расчета коэффициента устойчивости

Наименование грунта	$\rho_s$ , г/см <sup>3</sup>	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	n, д.е.	C, кПа	$\phi$ град.	E, МПа	$\gamma_{sat}$	$\gamma_{unsat}$
суглинок	2,71	2,01	0,39	31,2	20,5	4,7	20,1	19,7
супесь	2,68	1,93	0,35	60	23,5	6,8	20,6	18,9

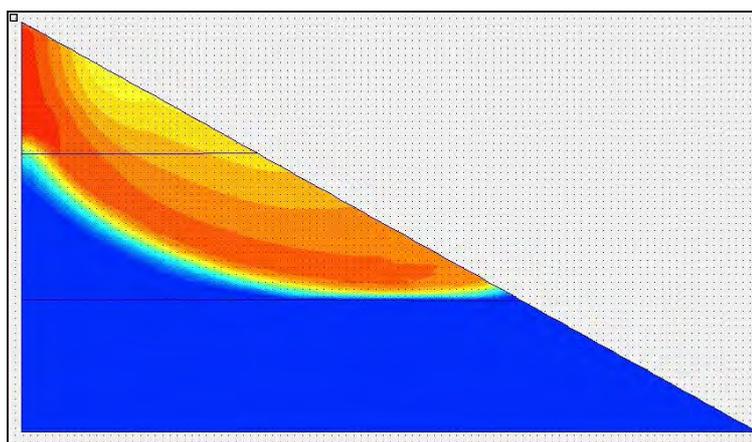


Рисунок 6 – Результат моделирования устойчивости склона при крутизне 30°

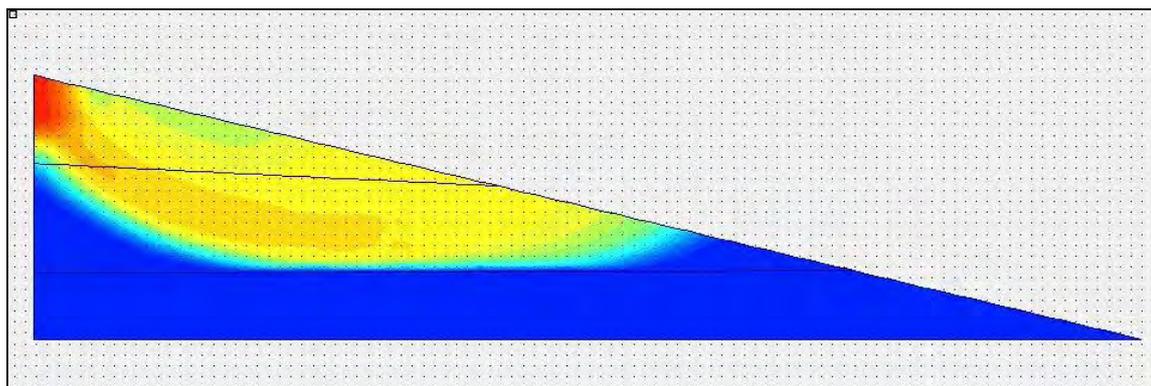


Рисунок 7 – Результат моделирования устойчивости склона при крутизне 10°

Как видно из рисунков 6 и 7, при одинаковых геологических условиях и одинаковых уровнях подземных вод, неустойчивые области (показанные оранжевым и красным цветом) занимают разные площади. При большей крутизне склона, большая площадь склона оказывается неустойчивой.

Таблица 6 – Значения коэффициентов устойчивости при разной крутизне склона

Тип фильтрационного разреза	$K_{уст}$ при 10°	$K_{уст}$ при 20°	$K_{уст}$ при 30°
ФР-II-1	3,77	2,26	1,40
ФР-II-2	5,28	2,58	1,73
ФР-III-1	4,16	2,83	1,77
ФР-III-2	3,56	2,1	1,38

Таким образом, значение коэффициента устойчивости склона значительно уменьшается при увеличении крутизны склонов (табл.6). Следует также отметить, что наибольшие значения  $K_{уст}$  при разных уклонах характерны для типов фильтрационного разреза Ф Р-II-2 (степень потенциальной подтопляемости умеренная) и ФР-III-1 (степень потенциальной подтопляемости высокая).

### **Третье защищаемое положение**

*Методика инженерно-геологического районирования, заключающаяся в том, что вначале производится выбор и картографирование факторов, оказывающих влияние на развитие геологических процессов, затем, используя методы анализа иерархий и отношения частотностей выполняется определение веса каждого фактора, далее строятся карты восприимчивости территории к развитию опасных геологических процессов сложением тематических слоев с их собственным весом и последующим ранжированием, позволяет прогнозировать эволюцию геологической среды в масштабах города.*

Границы г. Томска расширяются, появляются новые микрорайоны, которые пока являются малоизученными и не включены в карту зонирования территории по распространению ОГП, составленную сотрудниками ТГАСУ (В.Е. Ольховатенко, М.Г. Рутман, В.М. Лазарев, 2005).

Алгоритм построения авторских карт восприимчивости территории к развитию ЭГП представлен на рисунке 8.

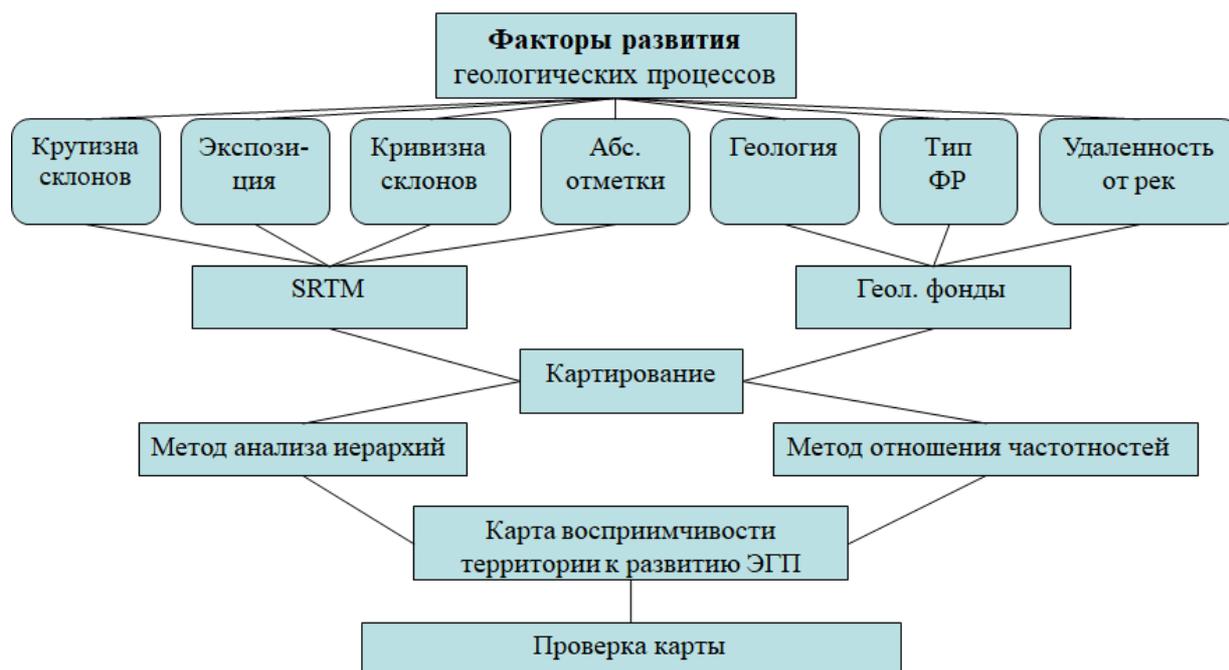


Рисунок 8 – Алгоритм построения карт восприимчивости территории к развитию ЭГП

При составлении карты восприимчивости первым шагом стало определение факторов, определяющих развитие ЭГП. По опыту подобных исследований в мире, изложенных более чем 45 публикаций, выбраны следующие факторы: уклон склона; экспозиция; высота области исследования; кривизна склона; расстояние до рек; стратиграфо-генетические комплексы и литология; фильтрационные разрезы; места развития геологических процессов. Каждый фактор включал определенное количество классов.

Следующим шагом после выбора факторов была подготовка тематических карт. Данные, использованные для подготовки этих слоев, были получены из базовых топографических карт, геологических карт, спутниковых снимков, личных полевых исследований. Тематические карты, соответствующие градиенту уклона, кривизне, аспекту и высоте, были получены непосредственно в растровом формате из цифровой модели рельефа (ЦМР), в то время как другие были созданы путем оцифровки растров (рис. 9-14). В качестве ЦМР использовалась два смежных снимка SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) для г. Томска, загруженные с сайта USGS Earthexplorer. Их обработка проводилась с помощью «ArcGIS Desktop».

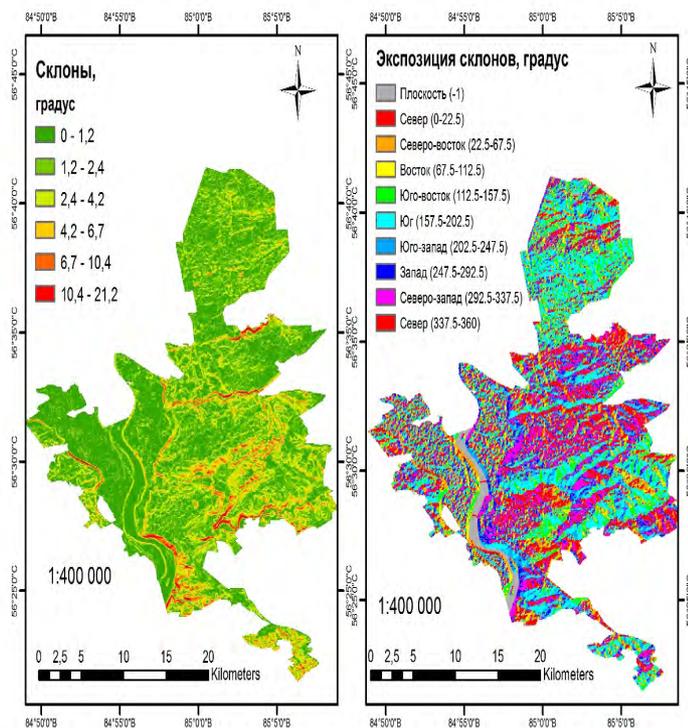


Рисунок 9 – Уклоны склонов

Рисунок 10 – Экспозиции склонов

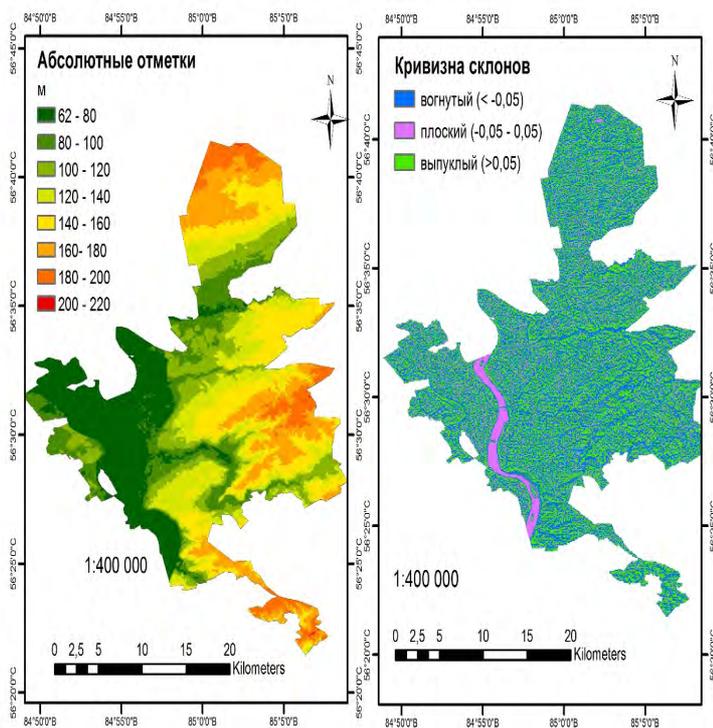


Рисунок 11 – Абсолютные отметки территории

Рисунок 12 – Кривизна склонов

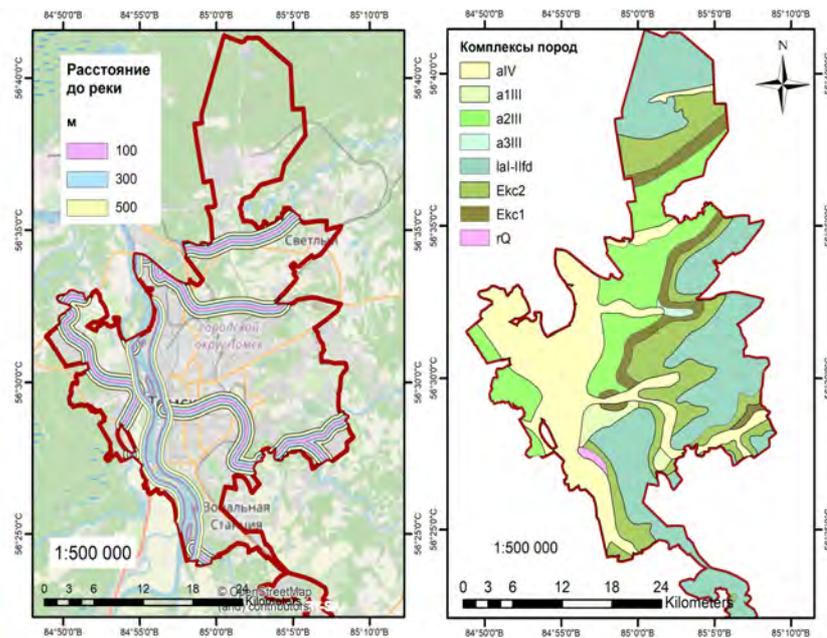


Рисунок 13 – Расстояние до рек      Рисунок 14 – Геологическое строение территории

Далее были созданы слои распространения оползней, оврагов и суффозионных процессов на территории г. Томска. Для этого была использована карта оползневых зон г. Томска, составленная специалистами ООО «Томскгеомониторинг», карта распространения оврагов, созданная Н.В. Осинцевой, материалы из СМИ и личные наблюдения автора для вынесения мест развития суффозии. Привязка карт была произведена по рекам Томи, Ушайке, Большой и Малой Киргизки. Оползни и овраги вынесены с помощью инструмента «полигон», суффозия с помощью инструмента «точка».

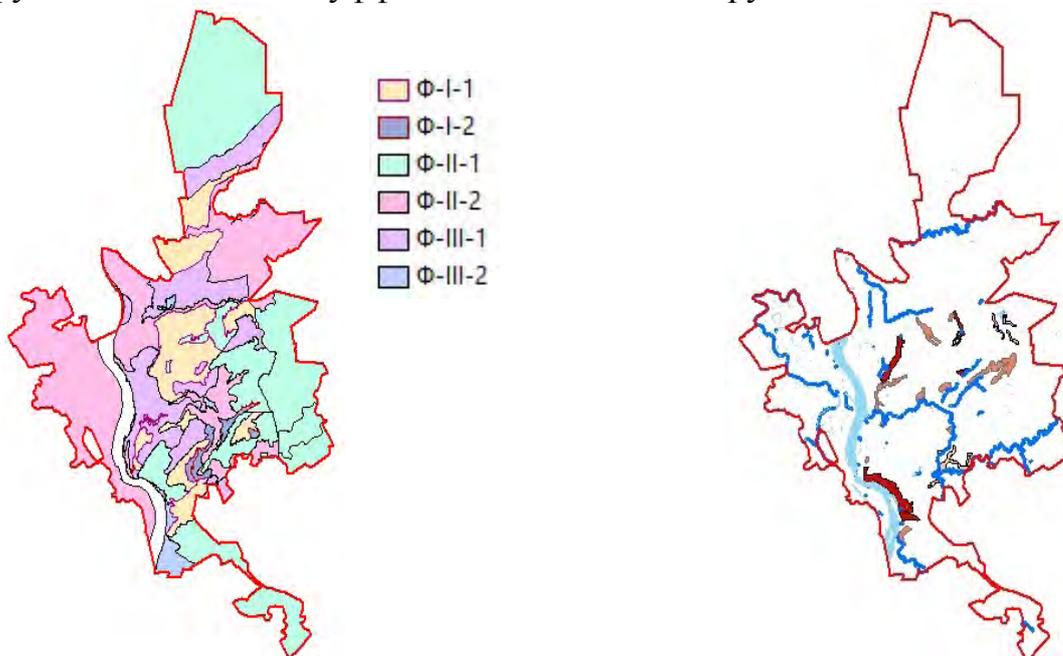


Рисунок 15 – Типы фильтрационных разрезов

Рисунок 16 – Оползнеопасные зоны г. Томска

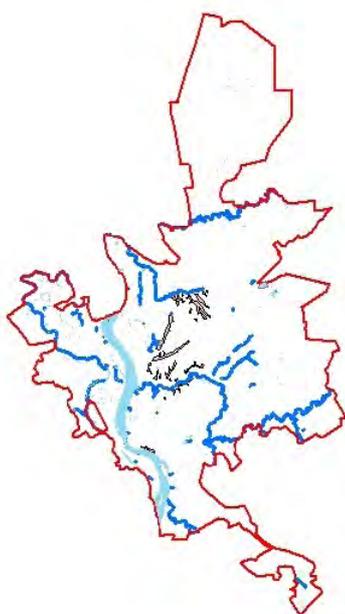


Рисунок 17 – Овраги г. Томска

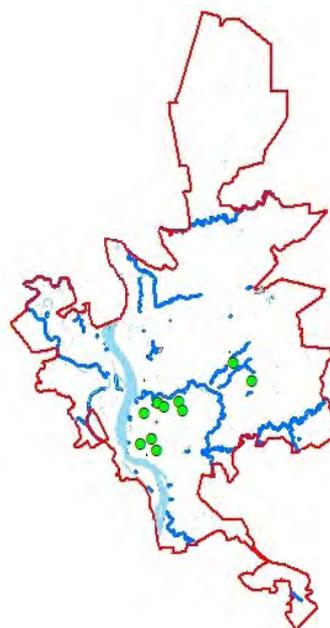


Рисунок 18 – Места распространения суффозии в г. Томске

Следующим шагом было присвоение значений веса растровым слоям - факторы и их классам. Этот шаг был реализован с использованием двух методов, чтобы добиться объективности при назначении весов, метода анализа иерархий (Analytic Hierarchy Process - АНП) и метода соотношения частотностей (Frequency Ratio - FR). Последний метод позволяет оценить реальную площадную пораженность территории ОГП с помощью ГИС технологий.

Для определения «веса» каждого фактора методом FR на первом этапе были посчитаны площади каждого класса каждого фактора и их доли (%) от площади города. Далее в пределах каждого класса определены площадь проявления ОГП (в км<sup>2</sup> и %), а также отношение % площади проявления ОГП к % площади самого класса (вес FR). Проведенные расчеты позволили выявить «вес» каждого класса выбранных факторов, данные приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Результаты определения «веса» факторов развития оползней

Слои	Класс	% класса	% оползней	Вес по FR	Вес по АНП
Экспозиция склона	Плоские (-1)	8,2	0,62	0,08	0,01
	Северные (0-22.5)	13,9	3,58	0,26	0,03
	Северо-восточные (22.5-67.5)	7,7	4,06	0,53	0,05
	Восточные (67.5-112.5)	10,9	2,82	0,26	0,03
	Юго-восточные (112.5-157.5)	20,9	8,26	0,39	0,034
	Южные (157.5-202.5)	11,3	24,81	2,19	0,08
	Юго-западные (202.5-247.5)	6,0	16,18	2,69	0,17
	Западные (247.5-292.5)	9,2	11,19	1,21	0,06
	Северо-западные (292.5-337.5)	9,1	20,80	2,28	0,12
Северные(337.5-360)	2,8	7,68	2,74	0,45	
Кривизна склона	Вогнутые (< -0.05)	44,9	47,7	1,1	0,23
	Плоские (-0.05-0.05)	9,4	3,9	0,4	0,12
	Выпуклые (> 0.005)	45,7	48,4	1,1	0,65
Абсолютные	<100	32,5	22,4	0,68	0,13

Слои	Класс	% класса	% оползней	Вес по FR	Вес по АНР	
отметки, м	100-150	38,2	56,4	1,47	0,66	
	150-200	29,2	21,2	0,73	0,19	
	>200	0,1	0		0,10	
Крутизна склона, град.	<6	95,6	62,34	0,7	0,06	0,064
	6-12	4,0	30,39	7,6	0,19	
	>12	0,4	4,64	11,6	0,74	
Расстояние от рек, м	<100	21,1	18,7	0,89	0,63	0,016
	100-300	40,0	30,3	0,76	0,24	
	>300-500	38,9	51,0	1,31	0,14	
Стратиграфо-генетические типы отложений	aIV	25,46	15,69	0,62	0,05	0,064
	a <sup>1</sup> III	1,85	1,87	1,01	0,09	
	a <sup>2</sup> III	16,09	18,98	1,18	0,06	
	a <sup>3</sup> III	0,35	1,33	3,80	0,19	
	laI-IIfd	32,30	25,13	0,78	0,02	
	Ekc <sub>1</sub>	5,71	4,80	0,84	0,03	
	Ekc <sub>2</sub>	17,86	28,66	1,60	0,13	
rQ	0,38	3,54	9,32	0,43		
Тип фильтрационного разреза	F-I-1	13	27	2,08	0,28	0,069
	F-I-2	1	2	2	0,04	
	F-II-1	38	43	1,13	0,24	
	F-II-2	31	7	0,23	0,08	
	F-III-1	15	13	0,87	0,21	
	F-III-2	2	8	4	0,12	

Все те же расчеты площадной пораженности по классам факторов были проведены и для оврагов. Проведенные расчеты позволили выявить «вес» каждого класса выбранных факторов, данные приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Результаты определения «веса» факторов развития оврагов

Слои	Класс	% класса	% оврагов	Вес по FR	Вес по АНР	
Экспозиция склона	Плоские (-1)	8,2	0	0	0	0,049
	Северные (0-22.5)	13,9	8,79	0,63	0,04	
	Северо-восточные (22.5-67.5)	7,7	8,79	1,14	0,05	
	Восточные (67.5-112.5)	10,9	5,72	0,52	0,03	
	Юго-восточные (112.5-157.5)	20,9	5,72	0,27	0,02	
	Южные (157.5-202.5)	11,3	17,46	1,54	0,09	
	Юго-западные (202.5-247.5)	6,0	12,15	2,03	0,20	
	Западные (247.5-292.5)	9,2	10,76	1,17	0,07	
	Северо-западные (292.5-337.5)	9,1	21,95	2,41	0,18	
Северные(337.5-360)	2,8	8,66	3,09	0,35		
Кривизна склона	Вогнутые (< -0.05)	44,9	56,69	1,26	0,65	0,003
	Плоские (-0.05-0.05)	9,4	5,06	0,54	0,12	
	Выпуклые (> 0.005)	45,7	38,25	0,84	0,23	
Абсолютные отметки, м	<100	32,5	28,75	0,88	0,18	0,069
	100-150	38,2	71,25	1,86	0,68	
	150-200	29,2	0	0	0,08	
	>200	0,1	0	0	0,06	

Слои	Класс	% класса	% оврагов	Вес по FR	Вес по АНР	
Крутизна склона, град.	<6	95,6	87,39	0,91	0,06	0,061
	6-12	4,0	11,87	2,97	0,19	
	>12	0,4	0,74	1,85	0,74	
Расстояние от рек, м	<100	21,1	25,6	1,21	0,44	0,016
	100-300	40,0	19,5	0,49	0,39	
	>300-500	38,9	54,9	1,41	0,17	
Стратиграфо-генетические комплексы отложений	aIV	25,46	20,51	0,81	0,16	0,015
	a <sup>1</sup> III	1,85	1,06	0,57	0,12	
	a <sup>2</sup> III	16,09	53,75	3,34	0,32	
	a <sup>3</sup> III	0,35	-	-	0,05	
	laI-IIfd	32,30	-	-	0,03	
	Ekc <sub>1</sub>	5,71	23,41	4,09	0,19	
	Ekc <sub>2</sub>	17,86	1,27	0,07	0,08	
rQ	0,38	-	-	0,03		
Тип фильтрационного разреза	F-I-1	13	70,5	5,42	0,62	0,053
	F-I-2	1	-		0,02	
	F-II-1	38	1,9	0,05	0,13	
	F-II-2	31	0,1	0,003	0,04	
	F-III-1	15	27,5	1,83	0,13	
	F-III-2	2	-		0,07	

Изучение значимости факторов, обуславливающих формирование и развитие ОГП, оценивалось также методом анализа иерархий. В программе Excel была подготовлена таблица для создания матрицы попарного сравнения факторов. В процессе сравнения необходимо было определить, во сколько раз альтернатива 1 оказывает большее влияние на развитие процесса, чем альтернатива 2. Например, насколько геологическое строение склона важнее его экспозиции и т.д. При сравнении пары факторов, остальные в этот момент в учет не принимаются. После проведения попарного сравнения необходимо проверить транзитивность матрицы (рассчитать индекс согласованности, значение которого не должно превышать 10%). В качестве примера в табл. 9 приведены значения весов для оползней, подобным образом найдены значения весов и для оврагов (табл.28 в диссертации).

Таблица 9 – Результаты попарного сравнения факторов развития оползней

Факторы	СГК	Тип ФР	Крутизна склона	Расстояние от рек	Кривизна склона	Экспозиция склона	Абс. отм.	Вес фактора по АНР
СГК	1	1	3	5	7	7	9	0,347
Тип ФР	1	1	2	3	5	5	7	0,266
Крутизна склона	1/3	1/2	1	2	3	5	5	0,156
Расстояние от рек	1/5	1/3	1/2	1	2	3	6	0,109
Кривизна склона	1/7	1/5	1/3	1/2	1	2	3	0,059
Экспозиция склона	1/7	1/5	1/5	1/5	1/2	1	3	0,040
Абсолютные отметки	1/9	1/7	1/7	1/7	1/3	1/3	1	0,023
Индекс согласованности (максимум 10%)						<b>2,86</b>		

Проведенное сравнение влияния факторов по оползням показало, что наибольшее значение или «вес» имеет генетический тип горных пород, далее – тип фильтрационных разрезов, крутизна склонов, расстояние до рек. Остальные факторы имеют меньший «вес». Аналогично попарное сравнение было проведено внутри каждого фактора по классам. Веса каждого класса каждого фактора методом АНР представлены в табл. 7 и 8.

Затем растровые тематические карты с присвоенными значениями для их классов были умножены на соответствующие веса и суммированы, чтобы получить простую карту, где каждая ячейка имеет определенное значение суммарного индекса восприимчивости (LSI) к оползням и о врагообразованию (рис. 19 и 21) и проведено классифицирование растра методом «Естественные границы» на 5 категорий: очень, низкая, низкая, средняя, высокая и очень высокая.

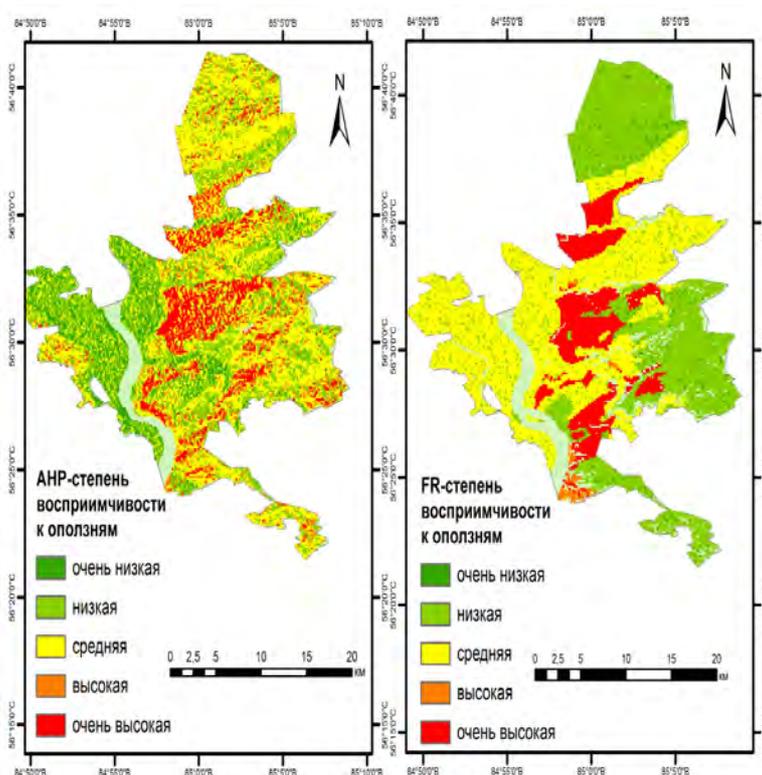


Рисунок 19 – Карта восприимчивости территории к развитию оползней

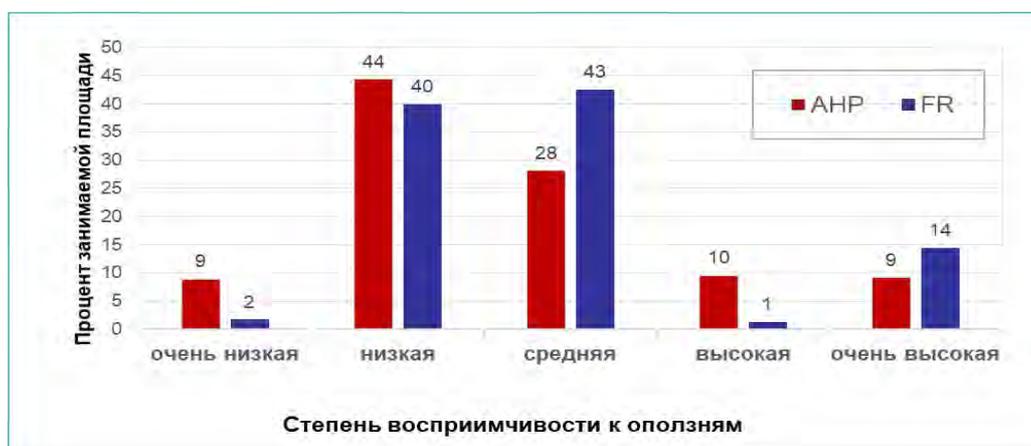


Рисунок 20 – Сравнение методов АНР и FR по степени восприимчивости

Как видно из карт, построенных с использованием разных методов, на территории города участки с очень низкой и низкой степенью восприимчивости к оползням занимают 42-53 % от площади города, со средней 28-42%, высокой от 1-10% и очень высокой степенью 9-14%.

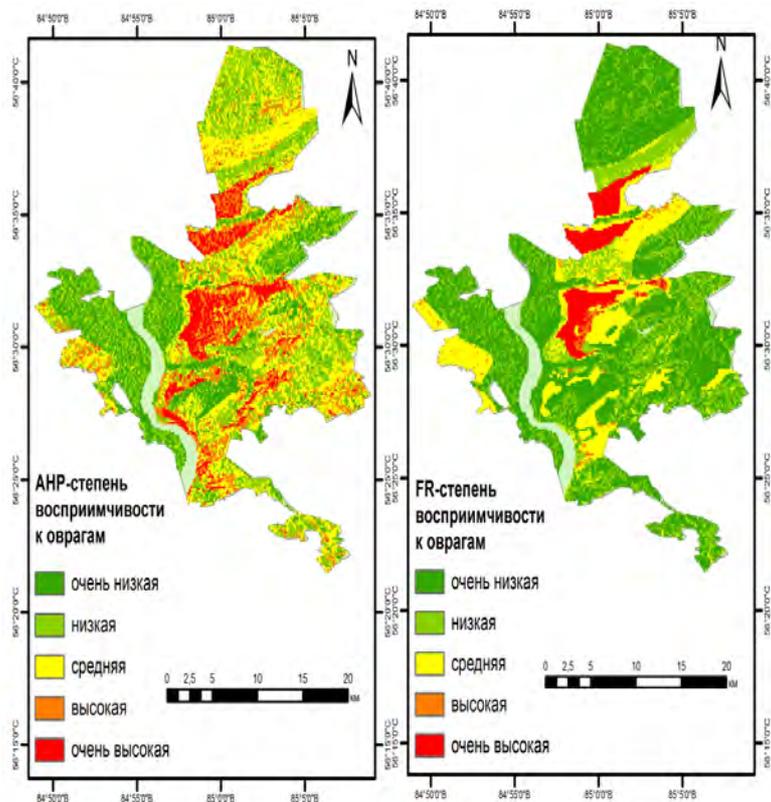


Рисунок 21 – Карта восприимчивости территории к развитию оползней

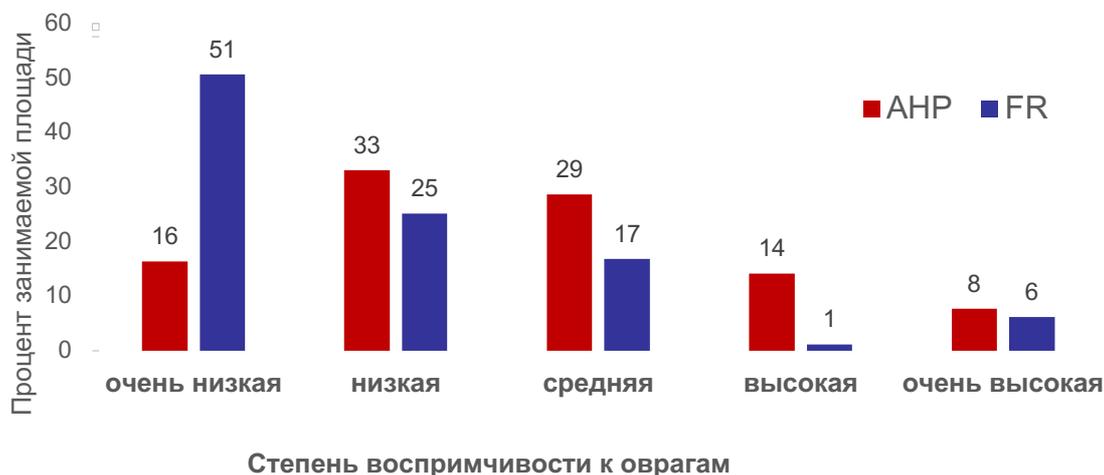


Рисунок 22 – Сравнение методов ANP и FR по степени восприимчивости

По отношению к оползням площади территории с очень низкой и низкой степенью восприимчивости занимают 49-76% от площади города, со средней 17-29%, высокой от 1-14% и очень высокой степенью 6-8%. Карты дали хорошую сходимость по участкам с низкой, средней и очень высокой восприимчивостью.

Для верификации построенных карт восприимчивости к развитию ОГП, основанных на разных методах нахождения весов, предложено использовать анализ ROC-кривых, предложенный A. Linden в 2006 г. ROC-кривая позволяет

определить точность метода, показывая число «правильных» срабатываний. Количественную интерпретацию ROC даёт показатель *AUC* (*area under ROC curve*) – площадь, ограниченная ROC-кривой и осью доли ложных положительных классификаций. Чем выше показатель *AUC*, тем качественнее классификатор, при этом значение 0,5 демонстрирует непригодность выбранного метода классификации (соответствует случайному гаданию). Для анализа ROC-кривых использовался статистический пакет SPSS Statistics. Значения *AUC*, полученные методами АНР и FR для оползней, составляют 0,750 и 0,844 соответственно, что говорит о высоком качестве прогнозных карт восприимчивости (рис.19); значения *AUC*, полученные для оврагов методами АНР и FR, составляют 0,905 и 0,800 соответственно, что говорит об отличном и высоком и качестве прогнозных карт (рис.21).

### **Выводы:**

1. Важнейшими факторами формирования природных условий развития опасных геологических процессов являются значения показателей физико-механических свойств грунтов. Изменение (а именно уменьшение) значений прочностных показателей в результате увеличения влажности приводит к уменьшению коэффициента устойчивости склонов и активизации развития оползневых процессов. Также значительное влияние на устойчивость склонов оказывает их крутизна, которую необходимо учитывать и не допускать увеличение крутизны в результате антропогенного воздействия.

2. Территория г. Томска характеризуется сложными природными условиями, что является фактором, благоприятствующим развитию опасных геологических процессов и явлений, таких как оползни, овраги, суффозия, подтопление, заболачивание, просадка, осадка и другие.

3. В г. Томске выявлен комплекс опасных геологических процессов, определены коэффициенты площадной пораженности территории оврагов и оползней, осложняющих хозяйственное освоение территории и снижающих эксплуатационную надежность зданий и сооружений. Активизация оползней вызвана действием следующих факторов: геологического, геоморфологического, гидрогеологического, техногенного. Факторами, способствующими активному развитию оврагов, являются следующие: геологический; климатический; геоморфологический; техногенный. Фактором развития суффозии является фильтрация подземных вод с необходимым для начала процесса напором за счет утечек из водопроводных и канализационных сетей и «барражного эффекта».

4. Для прогноза развития опасных геологических процессов на территории г. Томска были использованы методы анализа иерархий и соотношения частотностей, которые позволили построить карты восприимчивости геологической среды к развитию ОГП и показали хорошую сходимость результатов.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Статьи в рецензируемых журналах перечня ВАК РФ*

1. Емельянова Т.Я., Крамаренко В.В., Леонова А.В. О принципах, методике и результатах мелкомасштабного инженерно-геологического районирования территории по условиям развития современных геологических процессов // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2008. №4. С.57–61.
2. Емельянова Т.Я., Строкова Л.А., Крамаренко В.В., Леонова А.В. Принципы и критерии районирования геологической среды Сибирского федерального округа по условиям развития современных геологических процессов // Разведка и охрана недр. 2010. № 11. С. 72–76.
3. Строкова Л.А., Галеева Э .И., Леонова А.В. Районирование инженерно-геокриологических условий трассы трубопровода на Восточно-Мессояхском нефтегазоконденсатном месторождении // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 10. С.14–22.
4. Строкова Л.А., Ежкова А.В., Леонова А.В. Применение линеamentного анализа для оценки карстоопасности при проектировании магистрального газопровода в южной Якутии // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т.331. №.11. С.117–126.
5. Леонова А. В., Строкова Л. А. Оценка овражной эрозии на территории г.Томска с использованием ГИС-технологий // Известия Уральского государственного горного университета. 2021. Вып. 1 (61). С. 74-86.
6. Леонова А. В., Строкова Л. А., Никитенков А.Н. Оценка оползневых процессов на территории г.Томска с использованием ГИС-технологий // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2021. № 1. С.94-103.

### *Статьи в сборниках, индексируемых в scopus*

7. Leonova A.V., Khabibullin R.R., Baranova A.V. Geotechnical conditions contributing to negative geological process development in urban areas (the case of Kemerovo-city)// IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2016. 33. 012043 doi:10.1088/1755-1315/33/1/012043.
8. Leonova A.V., Lomakina K.M., Dmitrieva S.A., Baranova A.V. Geotechnical properties of gullyng in Tomsk oblast. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2016. 43 012037 doi:10.1088/1755-1315/43/1/012037
9. Brakorenko N., Leonova A., Nikitenkov A. Effect of soil water saturation on slope stability: Tomsk case study // E3S Web Conf., 98. 2019. 05005 / 16th International Symposium on Water-Rock Interaction and 13th International Symposium on Applied Isotope Geochemistry. July 21-26, 2019 Tomsk, Russia 5 p. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199805005>

### *Тезисы конференций*

10. Леонова А.В. Типизация оползней города Томска // Гидрогеология, инженерная геология и гидрогеоэкология: материалы конференции, посвященной 75-летию кафедры ГИГЭ ТПУ, Томск, декабрь 2005 г. / Томский политехнический университет; Гидрогеология, инженерная геология и гидрогеоэкология, материалы конференции; под ред. С. Л. Шварцева. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005. – С. 243–246.
11. Леонова А.В. Факторы оврагообразования в районе строительства Северной АЭС в Томской области / А. В. Леонова; науч. рук. Т. Я. Емельянова // Проблемы геологии и освоения недр: труды XIII Международного симпозиума имени академика М. А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 110-летию со дня рождения К. В. Радугина / Томский политехнический университет (ТПУ), Институт геологии и нефтегазового дела (ИГНД). – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – С. 206–207.