

# Оценка овражной эрозии на территории г. Томска с использованием ГИС-технологий

Анна Владимировна ЛЕОНОВА\*,  
Людмила Александровна СТРОКОВА\*\*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

## Аннотация

**Актуальность исследований.** В настоящее время в городе Томске увеличивается площадь застройки, появляются новые микрорайоны на ранее не освоенных землях (например, на левобережье р. Томь), происходят перепланировка и реконструкция центральной части города. Без учета динамики, механизмов, факторов и закономерностей развития опасных природных и техноприродных процессов, прогноза их развития невозможно качественное развитие территории.

**Цель работы** – установить закономерности распространения овражной эрозии, оценить интенсивность ее развития и спрогнозировать вероятность ее проявления в пределах новых границ города.

**Методы исследований.** Оценка и прогноз развития овражной эрозии выполнялись с использованием ГИС-технологий, которые являются важным инструментом в процессе управления городом благодаря их возможности обрабатывать и анализировать многомерные данные о геологической среде. Для определения «веса» факторов, обуславливающих развитие овражной эрозии, использовались два метода: анализа иерархий (Analytical Hierarchical Process, АНР) и соотношения частотностей (Frequency Ratio, FR). Для валидации карт восприимчивости использовался анализ Receiver Operating Characteristics (ROC) кривых.

**Результаты работы и область их применения.** Составлена карта распространения оврагов на территории города, включающая 23 полигона. Затем эти полигоны были случайным образом разбиты на две части: 16 полигонов (70 %) для обучения модели и 7 полигонов (30 %) для валидации модели. Для анализа пространственных закономерностей, обуславливающих развитие овражной эрозии, выбрано семь факторов: уклон поверхности, экспозиция склона, кривизна, абсолютные отметки поверхности, геологическое строение территории; типы фильтрационных разрезов, расстояние до реки. С использованием обучающего набора данных были построены прогнозные карты восприимчивости на основе проведенного ранжирования факторов двумя методами. Пространственная корреляция между местами оврагов и обуславливающими их факторами была выявлена с помощью статистических моделей на основе ГИС. Качество моделей оценивалось с помощью анализа ROC-кривых. Площадь под кривой (Area Under The Curve – AUC) составила 0,905 для АНР-модели и 0,800 для FR-модели, что говорит об отличном и высоком качестве прогнозных карт. И так, оба метода оказались пригодными в оценке восприимчивости территории к овражной эрозии. Построенные карты рекомендуется использовать для контроля и оперативного управления состоянием геологической среды, при оценке стоимости земель городской территории, в учебной работе (преподавание дисциплины «Инженерная геодинамика»).

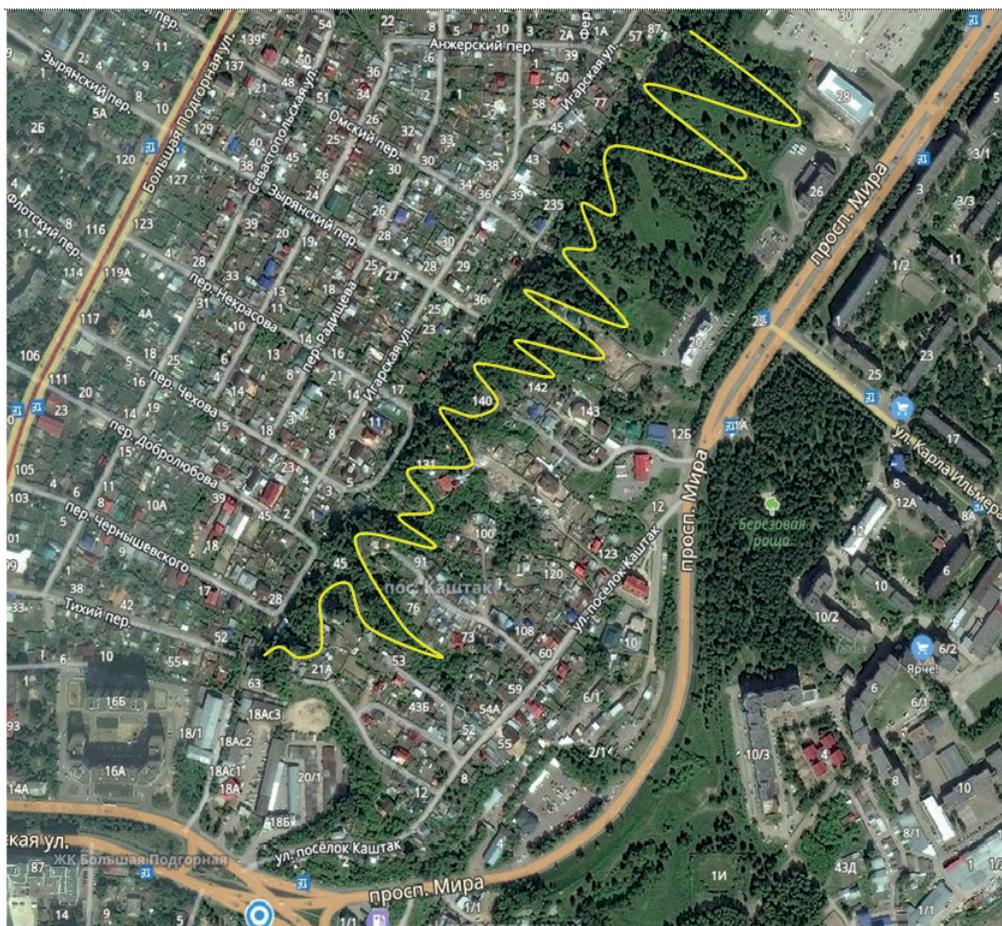
**Ключевые слова:** овраг, восприимчивость, картографирование, метод соотношения частотностей, метод анализа иерархий, анализ ROC-кривых

## Введение

На территории г. Томска развиты различные экзогенные геологические процессы (ЭГП). Причины и факторы, влияющие на их развитие; условия и закономерности, изучались М. И. Кучиным, Л. А. Рождественской, Т. Я. Емельяновой, Н. В. Крепша, В. Е. Ольховатенко и др. [1–3]. Овраги на территории города отмечаются на склонах высоких террас и долин рек, где значительны уклоны рельефа. Протяженность оврагов колеблется от 100–350 м до 1800–2200 м. Овраги г. Томска расположены в основном на трех участках [4]: 1) микрорайон Каштак (рис. 1), участок расположен полностью на третьей террасе р. Томь, возвышающейся над первой террасой на 15–25 м;

2) левый борт долины р. Мал. Киргизки от психбольницы до ст. Томск-Северный, овраги и балки прорезают первую надпойменную террасу этой речки; 3) долина р. Ушайки, где наиболее крупные овраги врезаются в третью террасу р. Томь. Сейчас в городе насчитывается около 70 оврагов общей площадью 196 га. Суммарная протяженность овражно-балочной сети около 25 км. Густота овражно-балочной сети на участках развития линейной эрозии составляет 0,9–1,2 км/км<sup>2</sup>, а в долине р. Малой Киргизки достигает 2,3 км/км<sup>2</sup>. В среднем 7,6 % городских земель занято оврагами. В одной из работ Н. В. Осинцевой [5] названы следующие условия и факторы развития

\*avleonova@tpu.ru  
\*\*sla@tpu.ru



**Рисунок 1. Микрорайон Каштак (Google map). Желтой линией выделен эрозионный склон.**  
**Figure 1. Kashtak microdistrict (Google map). The yellow line shows the erosion slope.**



**Рисунок 2. Вершина оврага вблизи здания № 26 по пр. Мира, г. Томск. 2018 г.**  
**Figure 2. The top of the gully near the building no. 26, Mira Avenue, Tomsk. 2018.**



**Рисунок 3. Днище оврага, г. Томск, 2020 г.**  
**Figure 3. The bottom of the gully, Tomsk, 2020.**



**Рисунок 4. Искривленные стволы деревьев на борке оврага, г. Томск, 2020 г.**  
**Figure 4. Curved tree trunks on the edge of the gully, Tomsk, 2020**

оврагов. Условия: наличие в верхней части геологического разреза легкоразмываемых пород; крутых склонов; временных водных потоков с размывающей скоростью. Факторами, способствующими активному развитию оврагов, являются следующие: превышение осадков над испарением, отсутствие растительности, наличие западин на поверхности, положительные неотектонические движения и изменение положение базиса эрозии, активно развивающаяся хозяйственная деятельность человека. Например, траншея, проложенная для водопровода в 1955 г. в районе Лагерного сада, стала причиной возникновения оврага [6].

Вдоль склона Каштачной горы населением были прорыты канавы для улучшения поверхностного стока. Они стали началом оврагов, большинство из которых растет со скоростью 2,5–3,5 м/год. Некоторые овраги подходят своими вершинами к самому проспекту Мира (рис. 2).

Почти все овраги являются растущими. На склонах есть промоины, от вершины по дну оврага есть следы временного водотока талых и дождевых вод, небольшие оползневые цирки.

В августе 2020 г. А. В. Леоновой проведено маршрутное обследование склонов в микрорайоне Каштак с целью установления состояния склона в настоящее время. В результате маршрутного обследования было выявлено, что днище оврага является сухим и заросшим, отсутствует водоток (рис. 3). По бортам оврагов встречаются деревья

с искривленными стволами, что свидетельствует о наличии подвижек грунтовых масс в прошлом (рис. 4).

Инженерно-геологическое районирование территории г. Томска с учетом ЭГП выполнялось разными авторами в 1955, 1990, 2005 гг. [1]. Картографические работы выполнены вручную, карты отрисованы с многочисленными погрешностями по привязке скважин. В связи с изменением границ города актуальным является построение новых карт с использованием современных ГИС-технологий, позволяющих выполнить оценку, обработку инженерно-геологической информации на более качественном уровне.

**Цель данной работы** – установление закономерностей распространения овражной эрозии, оценка интенсивности ее развития и прогноз вероятности ее проявления в пределах новых границ города.

**Методика выполнения работ**

Анализ способов картографирования геологических опасностей показал, что наиболее востребованной в методическом плане в настоящее время является технология построения карт восприимчивости (предрасположенности) территории к развитию экзогенных геологических процессов. За последние пять лет опубликовано более 5400 работ, посвященных разработке карт районирования подверженности оползням (*landslide susceptibility<sup>1</sup> zoning map*) различных районов мира, и более 940 работ – использованию

<sup>1</sup>Susceptibility – восприимчивость, чувствительность, подверженность, предрасположенность, склонность, уязвимость.

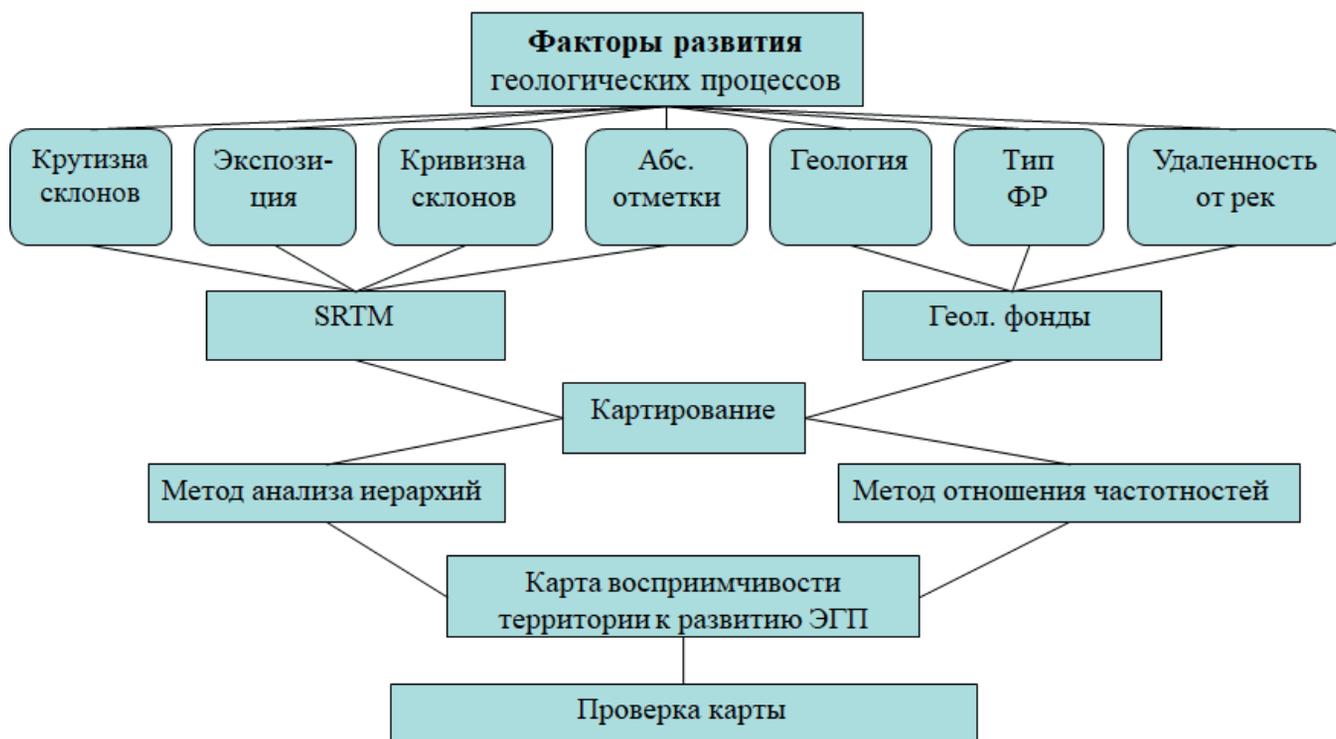


Рисунок 5. Алгоритм построения карт восприимчивости территории к развитию ЭГП.  
Figure 5. Algorithm for construction maps of the geohazard susceptibility.

разработанной методики для составления карт районирования подверженности другим геологическим процессам, таким как эрозии, суффозии и т. д. [7–14].

Технология составления подобных карт заключается в следующей последовательности. Вначале выполняется подготовка тематических слоев, таких как карта проявления ЭГП (инвентаризационная карта); количество выпадающих осадков; литология; геоморфология; гидрогеология; цифровая модель рельефа, с которой можно установить абсолютные отметки рельефа, угол склона, экспозиции, и других факторов, обуславливающих возникновение и интенсивности развития ЭГП. Поскольку значимость каждого фактора в общей оценке разная в зависимости от региональных геологических, морфометрических, климатических, техногенных условий, необходимо выполнять оценку веса каждого фактора. Такая оценка выполняется с помощью различных статистических и детерминированных подходов в последние годы и с использованием теории нечетких множеств. В данной работе для определения веса каждого фактора использовались два метода: анализа иерархий (Analytical Hierarchical Process, АНП) и соотношения частотностей (Frequency Ratio, FR). Далее тематические карты умножаются на соответствующий вес каждого фактора и объединяются в одну средствами наложения, чтобы получить единую карту восприимчивости к ЭГП. Эта карта подвергается классификации на классы (низкой, средней, высокой степени) восприимчивости в светофорной раскраске. Обычно выделяется от 3 до 5 классов восприимчивости исследуемой области. Для проверки качества моделей предложены разные статистические методы. Наиболее распространены

проверки ROC-кривых относительного индекса плотности оползней и др.

Далее приведена схема, демонстрирующая алгоритм построения карт восприимчивости территории к развитию ЭГП (рис. 5).

#### Результаты

##### 1. Подготовка информационных слоев

При составлении карты восприимчивости первым шагом стало определение факторов, определяющих развитие овражной эрозии. По опыту подобных исследований в мире, изложенных более чем в 45 публикациях, выбраны следующие факторы: уклон склона; экспозиция; абсолютные отметки поверхности; кривизна склона; расстояние до рек; стратиграфо-генетические комплексы и литология; фильтрационные разрезы; места развития геологических процессов. Каждый фактор включал определенное количество классов (рис. 6). Всего было выбрано 7 факторов (слоев), внутри которых выделено 38 классов.

Следующим шагом после выбора факторов была подготовка тематических карт. Исходными данными для картографических построений послужили: цифровая модель рельефа (ЦМР) – два смежных снимка SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) для г. Томска с сайта USGS Earthexplorer и производные из нее карты: уклоны, экспозиция склонов; кривизна и абсолютные отметки, построенные с помощью «ArcGIS Desktop»; карта-схема зонирования инженерно-геологических условий, составленная В. Е. Ольховатенко [1]; карта-схема типов фильтрационных разрезов [15]; геологическая карта города 1:25 000, карта распространения оврагов, созданная Н. В. Осинцевой [5], дополненная личными наблюдениями авторов. Привязка

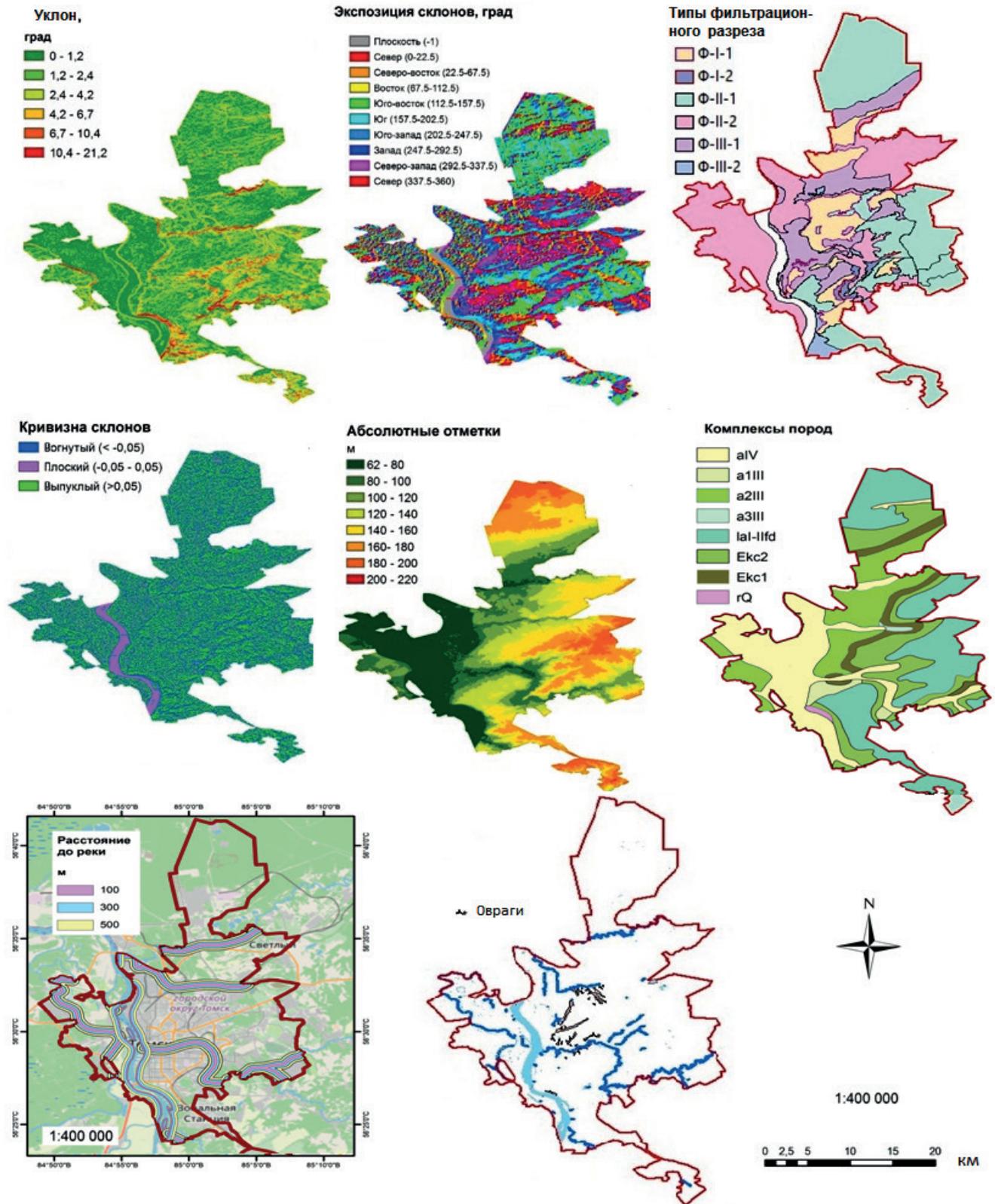


Рисунок 6. Исходные слои для карты восприимчивости.  
 Figure 6. Data layers for susceptibility map.

карт была произведена по рекам Томь, Ушайка, Большая и Малая Киргизки.

**Описание факторов и их классов**

Уклон склона является основным параметром при оценке овражной эрозии. Градиент уклона контролирует

скорость подземного стока после выпадения атмосферных осадков, скорость поверхностного стока и содержание влаги в грунтах. По мере увеличения уклона напряжение сдвига в рыхлом почвенном покрове обычно также увеличивается. Исходный файл растрового формата был

получен непосредственно из матрицы высот с помощью метода Хорна. Значения уклонов были разделены на следующие классы:  $< 6^\circ$ ;  $6-12^\circ$ ;  $> 12^\circ$ .

**Экспозиция склона.** Этот фактор многие авторы также считают важным при составлении карт восприимчивости территории к развитию овражной эрозии [7]. Здесь учитываются такие параметры, как воздействие солнечного света, осушающие ветры, осадки (степень насыщения) и неоднородности растительного покрова. Все это может влиять на активизацию развития оврагов [8]. По экспозиции территория города разделена на 9 категорий: плоский ( $-1^\circ$ ); север ( $0^\circ-22,5^\circ$ ;  $337,5^\circ-360^\circ$ ); северо-восток ( $22,5^\circ-67,5^\circ$ ); восток ( $67,5^\circ-112,5^\circ$ ); юго-восток ( $112,5^\circ-157,5^\circ$ ); юг ( $157,5^\circ-202,5^\circ$ ); юго-запад ( $202,5^\circ-247,5^\circ$ ); запад ( $247,5^\circ-292,5^\circ$ ) северо-запад ( $292,5^\circ-337,5^\circ$ ).

**Абсолютные отметки поверхности.** Влияние абсолютных отметок на развитие овражной эрозии часто отображается как косвенная зависимость от других факторов. Тематическая карта высот была разделена на 4 класса с разными диапазонами: а)  $< 100$  м; б)  $100-150$  м; в)  $150-200$  м; г)  $> 200$  м.

**Кривизна склона.** Значения кривизны характеризует морфологию откосов. Кривизна была выбрана в качестве причинного фактора на том основании, что она влияет на гидрологическое состояние почвенного покрова. Потенциально после выпадения осадков почвенный покров на вогнутом склоне может содержать больше воды и удерживать ее дольше, чем на выпуклом склоне. С другой стороны, часто на выпуклых склонах отмечаются выходы скальных пород. Следовательно, участки профиля вогнутого склона имеют более высокую склонность к эрозии, чем выпуклые участки. В растре положительные значения кривизны указывают, что поверхность в этих ячейках является выпуклой. Напротив, отрицательные значения указывают на то, что поверхность в этих ячейках вогнута. Нулевое значение указывает, что поверхность плоская. Чем отрицательнее значение, тем выше вероятность возникновения овражной эрозии, а чем положительнее значение, тем ниже вероятность.

**Расстояние до рек.** Реки могут отрицательно влиять на стабильность, размывая склоны или насыщая нижнюю часть при повышении уровня воды. [9]. Также важна взаимосвязь между поверхностными и грунтовыми водами.

**Стратиграфо-генетические комплексы и состав пород (литология)** – один из наиболее важных параметров при изучении опасных геологических процессов, поскольку разные литологические единицы имеют разную степень предрасположенности территории к ЭГП [10]. Слой оцифрован по геологической карте города 1:25 000.

**Фильтрационные разрезы (ФР).** К. И. Кузевановым [15] построена карта типов фильтрационных разрезов по строению верхней 15-метровой грунтовой толщи. Водопроницаемые слои при избытке дополнительного питания склонны к развитию процессов подтопления. Их разгрузка в эрозионных уступах способна спровоцировать развитие суффозии и оврагообразования. Утяжеление пород на склоне за счет замачивания может активизировать оползневые процессы.

**Карта распространения оврагов.** В основе этого слоя использовались данные Н. В. Осинцевой, дополненные

авторами. Овраги вынесены с помощью инструмента «полигон». Всего слой включает 23 полигона из 74 оврагов, некоторые крупные овражные сети были объединены в единый полигон, например на Каштаке (рис. 1). Далее эти полигоны были случайным образом разбиты на две выборки: 16 полигонов (70 %) для обучения модели и 7 полигонов (30 %) для валидации модели. С использованием обучающего набора данных были построены прогнозные карты восприимчивости, прогностическая способность карты оценивалась по проверочному набору данных.

Пространственная корреляция между местами оврагов и обуславливающими их факторами была выявлена с помощью статистических моделей на основе ГИС.

## II. Определение «веса» факторов

Следующим шагом было выяснение «веса» каждого фактора и его классов. Этот шаг был реализован с использованием двух методов, чтобы добиться объективности при назначении «веса», метода анализа иерархий (Analytical Hierarchical Process, АНП) и соотношения частотностей (Frequency Ratio, FR). Последний метод позволяет оценить реальную площадную пораженность территории ЭГП с помощью ГИС-технологий [16].

**Метод соотношения частотностей (Frequency Ratio, FR).** Для определения «веса» каждого фактора методом FR на первом этапе были посчитаны площади класса каждого фактора и их доли, %, от площади города. Далее в пределах каждого класса определены площадь проявления ЭГП,  $\text{км}^2$  и %, а также отношение процента площади проявления ЭГП к проценту площади самого класса (вес FR).

«Вес» каждого фактора и класса факторов приведен в табл. 1.

В г. Томске преобладают склоны с крутизной до  $6^\circ$ , на их долю приходится 64 % территории города. При этом на них развито 16 % оврагов от общего количества. Склоны с крутизной  $6-12$  % охватывают 31 % территории, и на них расположено 52 % площади оврагов. Склонов с уклоном более  $12^\circ$  в г. Томске всего 5 %, при этом на них встречено 32 % от всех оврагов. Таким образом, можно сделать вывод, что крутизна склонов оказывает влияние на активизацию оврагов. В г. Томске преобладают склоны юго-западной, северной и южной экспозиции. Наиболее подвержены оврагообразованию (в порядке убывания) склоны северной (24 % оврагов), северо-западной (19 %), юго-западной (16 %), южной (12 %), западной (9 %) экспозиции.

На территории г. Томска 23 % склонов имеют абсолютные отметки до 100 м, при этом на них 21 % оврагов. Склоны с абсолютными отметками от 100 до 150 м занимают 56 % территории города, при этом на них 71 % оврагов. И склоны с абсолютными отметками от 150 до 200 м занимают 21 % территории, но при этом на них овраги не встречены. Таким образом, наибольшее количество оврагов, как и оползней, развито на склонах с абсолютными отметками от 100 до 150 м.

Анализ кривизны склонов показал, что вогнутых склонов на территории города 48 %, на них развито 47,7 % оврагов. Выпуклых поверхностей на территории города 48 %, на них развито 32 % оврагов. Таким образом, овраги развиты более активно на вогнутых склонах.

Анализ приуроченности оврагов к территориям, расположенным на разных расстояниях от рек, позволил

**Таблица 1. Результаты определения «веса» факторов развития оврагов методами FR и АНП.**  
**Table 1. The results of determining the «weight» of the gulley-related factors by FR method and ANP method.**

Слои	Класс	Процент класса	Процент оврагов	Вес по FR	Вес по АНП	
Экспозиция склона, град	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	
Кривизна склона	Северные (337,5–360)	2,8	8,66	3,09	0,35	0,003
	Вогнутые (< -0,05)	44,9	56,69	1,26	0,65	
	Плоские (-0,05–0,05)	9,4	5,06	0,54	0,12	
Абсолютные отметки, м	Выпуклые (> 0,005)	45,7	38,25	0,84	0,23	0,069
	< 100	32,5	28,75	0,88	0,18	
	100–150	38,2	71,25	1,86	0,68	
	150–200	29,2	0	0	0,08	
Крутизна склона, град	> 200	0,1	0	0	0,06	0,061
	< 6	95,6	87,39	0,91	0,06	
	6–12	4,0	11,87	2,97	0,19	
Расстояние от рек, м	> 12	0,4	0,74	1,85	0,74	0,016
	< 100	1,45	10,97	0,78	0,44	
	100–300	2,77	9,34	0,34	0,39	
	300–500	2,69	12,41	0,48	0,17	
Стратиграфо-генетические типы отложений	> 500	93,09	67,28	0,72	0	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	0	0,05	
	a IV	25,46	20,51	0,81	0,16	
	Екс <sub>1</sub>	5,71	23,41	4,09	0,19	
	Екс <sub>2</sub>	17,86	1,27	0,07	0,08	
laI–IIfd	32,30	0	0	0,03		
rQ <sub>IV</sub>	0,38	0	0	0,03	0,053	
Тип фильтрационного разреза	Ф–I–1	13	70,5	5,42		0,62
	Ф–I–2	1	0	0		0,02
	Ф–II–1	38	1,9	0,05		0,13
	Ф–II–2	31	0,1	0,003		0,04
	Ф–III–1	15	27,5	1,83		0,13
	Ф–III–2	2	0	0	0,07	

сделать следующие выводы. Территории, расположенные на расстоянии до 100 м от рек, занимают 1,45 % от общей площади выделенных территорий, при этом на них развито 10,97 % оврагов. Территории, удаленные на расстояние от 100 до 300 м, занимают 2,77 % площади, при этом на них развито 9,34 % оврагов. И территории, находящиеся на расстоянии 300–500 м от рек, занимают 2,69 %, при этом на них развито 12,41 % оврагов. Таким образом, оврагообразование наиболее активно развито на расстоянии более 500 м от рек (67,28 %).

Анализ приуроченности оврагов к определенным стратиграфо-генетическим комплексам показал, что наиболее активно они развиваются на территориях, сложенных верхнечетвертичными отложениями второй надпойменной террасы р. Томи (a<sup>2</sup>III) и в отложениях кочковской свиты (Екс<sub>1</sub>).

Анализ приуроченности оврагов к типам фильтрационных разрезов показал, что наиболее активно овраги развиты на участках с типами Ф-I-1 (однослойные

водопроницаемые породы с хорошими фильтрационными свойствами; степень подтопленности низкая), Ф-III-1 (трехслойные разрезы с высокой степенью потенциальной подтопленности).

*Метод анализа иерархий (Analytical Hierarchical Process, ANP).* Изучение значимости факторов, обуславливающих формирование и развитие оврагов, проводилось также методом анализа иерархий, предложенным Т. Л. Саати в 1970 г. Предложенная им шкала соотношений позволяет оценить важность одного фактора относительно другого. В программе Excel была подготовлена таблица для создания матрицы попарного сравнения факторов развития ЭГП. 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

Таблица 2. Результаты попарного сравнения факторов развития оврагов.  
Table 2. The results of pair-wise comparison of the gully-related factors.

Факторы	СГК	Тип ФР	Крутизна склона	Расстояние от рек	Кривизна склона	Экспозиция склона	Абсолютные отметки	Нормализованные оценки вектора приоритетов
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 %)							2,86	

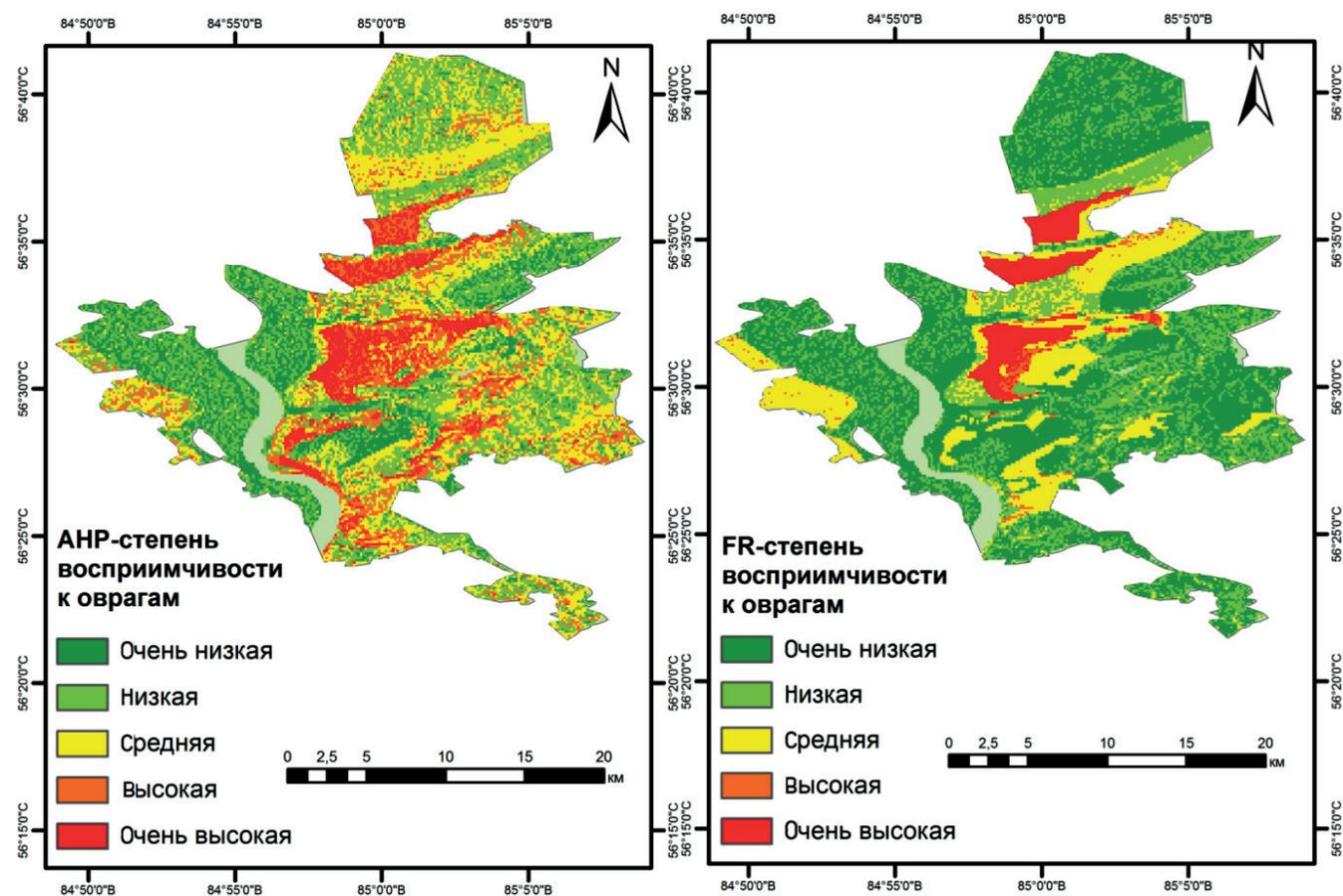


Рисунок 7. Прогнозные карты восприимчивости территории к оврагам.  
Figure 7. Resulting gully susceptibility maps.

попарного сравнения необходимо проверить транзитивность матрицы (рассчитать индекс согласованности, значение которого не должно превышать 10 %). Проведенное сравнение влияния факторов по оврагам (табл. 2) показало, что наибольшее значение, или «вес», имеет стратиграфо-генетический комплекс (СГК) пород, далее – тип фильтрационных разрезов (ФР), крутизна

склонов, расстояние до рек. Остальные факторы имеют меньший «вес». Аналогично попарное сравнение было проведено внутри каждого фактора по классам. «Вес» каждого класса и каждого фактора методом АНР представлен в табл. 1. Так, наиболее активно овраги развиты в верхнечетвертичных аллювиальных отложениях первой и второй надпойменных террас р. Томь, отложениях

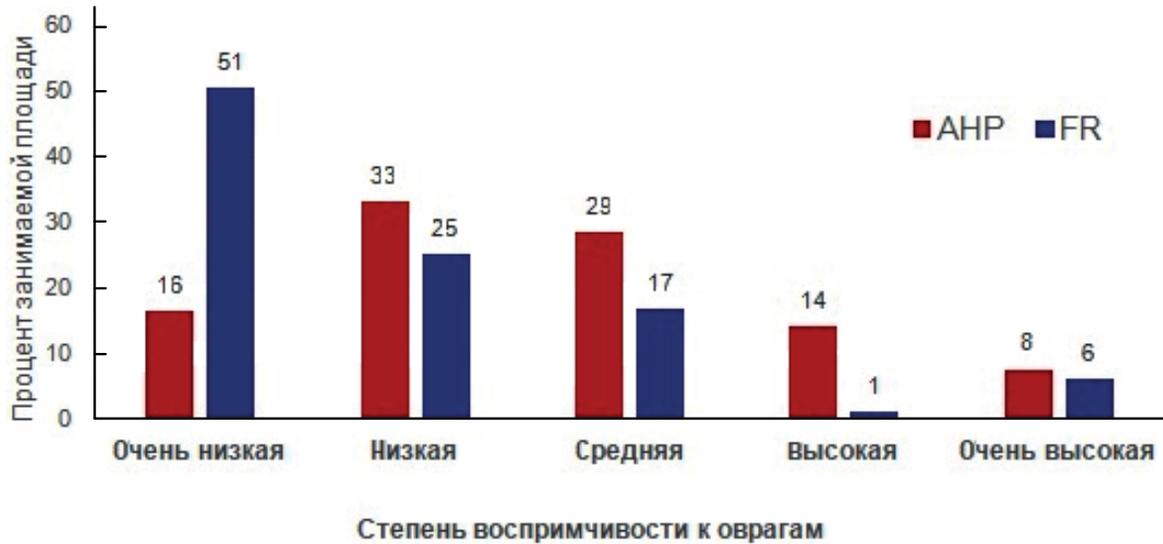


Рисунок 8. Сравнение методов АНР и FR по степени восприимчивости для оврагов.  
Figure 8. Comparison of AHP and FR methods by degree of gully susceptibility.

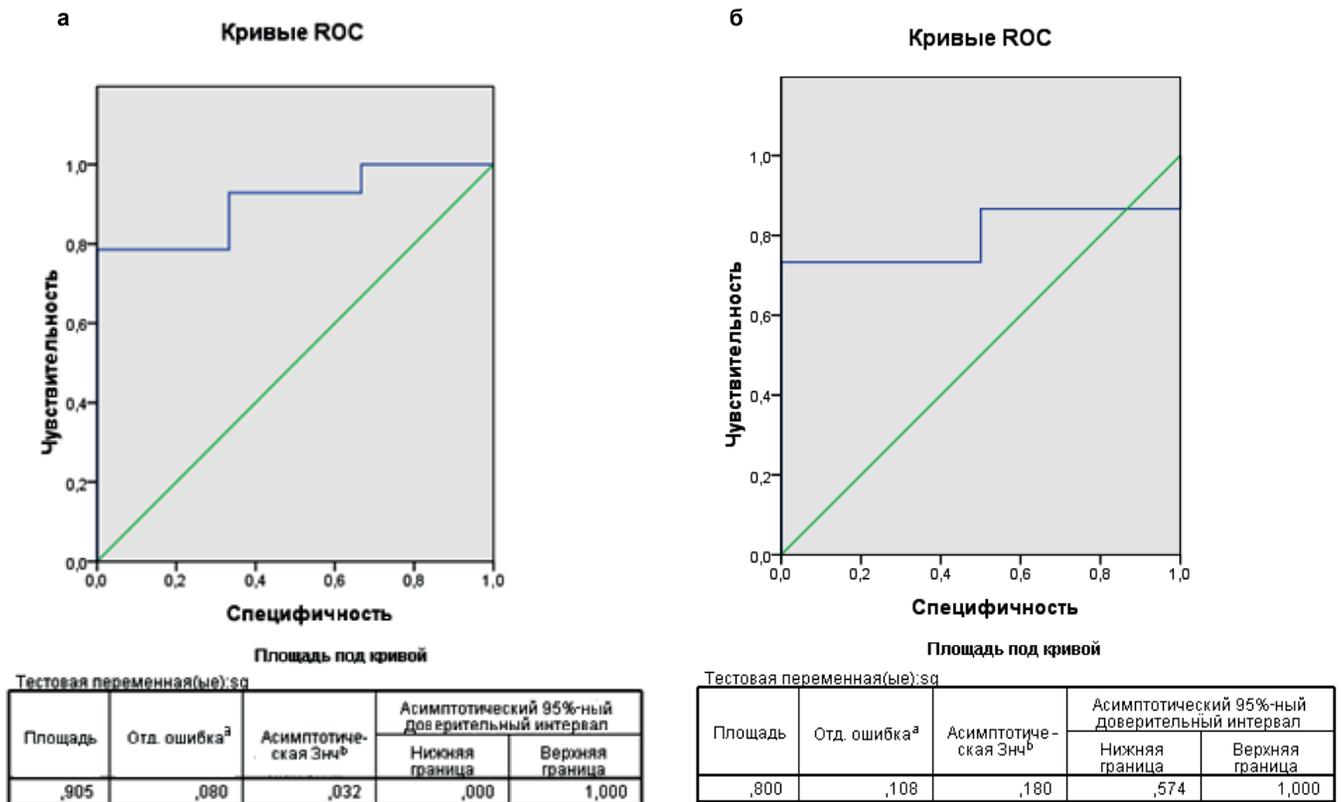


Рисунок 9. ROC-кривые для оврагов: а – методом АНР; б – методом FR.  
Figure 9. ROC-curves for gully. a – by the AHP method; b – by the FR method.

кочковской свиты и в современных аллювиальных грунтах. В результате попарного сравнения типов фильтрационных разрезов было получено следующее: наиболее благоприятен для образования оврагов разрез Ф-I-1 (сложенный водопроницаемыми породами), Ф-III-1 (разрез, характеризующийся наиболее сложным взаимоотношением потенциально обводняемых толщ), в меньшей степени Ф-II-1 (в верхней части геологического разреза

залегают водопроницаемые породы, подстилаемые слабопроницаемыми породами). Среди морфометрических параметров наибольший «вес» имеет большая крутизна склонов. Северные, юго-западные, северо-западные и южные экспозиции склонов наиболее благоприятны для развития оврагов; также более благоприятны для развития оврагов вогнутые склоны и склоны, находящиеся на расстоянии менее 100 м и 100–150 м от рек.

### III. Построение и анализ карт восприимчивости

Затем растровые тематические карты с присвоенными значениями для их классов были умножены на соответствующий «вес» и суммированы для получения простой карты, где каждая ячейка имеет определенное значение суммарного индекса восприимчивости к оврагам (рис. 7), и проведено классифицирование раstra методом «Естественные границы» на 5 категорий: очень низкая, низкая, средняя, высокая и очень высокая.

Для сравнения двух методов были определены площади зон с разной степенью восприимчивости (рис. 8). Так, площади территории с очень низкой и низкой степенью восприимчивости к оврагам занимают 49–76 % от площади города со средней 17–29 %, высокой от 1–14 % и очень высокой степенью 6–8 %. Карты восприимчивости по АНР и FR дали хорошую сходимость по участкам с низкой, средней и очень высокой восприимчивостью.

### IV. Валидация карт

Для валидации построенных карт восприимчивости к развитию оврагов, основанных на разных методах нахождения «веса», предложено использовать анализ ROC-кривых, предложенный A. Linden в 2006 г. ROC-кривая позволяет определить точность метода, показывая число «правильных» срабатываний [18]. Количественную интерпретацию ROC дает 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 для оврагов методами АНР и FR, составляют 0,905 и 0,800 соответственно (рис. 9), что говорит об отличном и высоком качестве прогнозных карт. Прогностическая способность карт по АНР и FR, определенная по проверочному набору из 7 полигонов, составила 0,944 и 0,813 соответственно.

### Выводы

1. Территория г. Томска характеризуется сложными инженерно-геологическими условиями, что является

фактором, благоприятствующим развитию опасных геологических процессов и явлений, таких как оползни, овраги, суффозия, подтопление, заболачивание, просадка, и др. Эти процессы осложняют хозяйственное освоение территории и снижают эксплуатационную надежность зданий и сооружений. Составлена карта распространения оврагов на территории города, включающая 23 полигона. Затем эти полигоны были случайным образом разбиты на две части: 16 полигонов (70 %) для обучения модели и 7 полигонов (30 %) для валидации модели.

2. Для анализа пространственных закономерностей, обуславливающих развитие овражной эрозии, выбрано семь факторов: уклон поверхности, экспозиция склона, кривизна, абсолютные отметки поверхности, геологическое строение территории, типы фильтрационных разрезов, расстояние до реки.

3. Проведено ранжирование факторов, способствующих активному развитию оврагов. Значимость факторов оценена двумя методами: методом анализа иерархий и методом соотношения частотностей. Последний метод позволил оценить площадную пораженность территории оврагами.

4. С использованием обучающего набора данных были построены прогнозные карты восприимчивости на основе проведенного ранжирования факторов двумя методами. Пространственная корреляция между местами оврагов и обуславливающими их факторами была выявлена с помощью статистических моделей на основе ГИС.

5. Качество моделей оценивалось с помощью анализа ROC-кривых. Площадь под кривой (Area Under The Curve – AUC) составила 0,905 для АНР-модели и 0,800 для FR-модели, что говорит об отличном и высоком качестве прогнозных карт. Итак, оба метода оказались пригодными в оценке восприимчивости (предрасположенности) территории к овражной эрозии.

6. Построенные карты рекомендуется использовать для контроля и оперативного управления состоянием геологической среды, при оценке стоимости земель городской территории, в учебной работе (преподавание дисциплины «Инженерная геодинамика»).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ольховатенко В. Е., Рутман М. Г., Лазарев В. М. Опасные природные и техноприродные процессы на территории города Томска и их влияние на устойчивость природно-технических систем. Томск: Печатная мануфактура, 2005. 152 с.
2. Ольховатенко В. Е., Лазарев В. М., Филимонова И. С. Геоэкологические проблемы застройки территории г. Томска и мероприятия по ее инженерной защите // Вестник ТГАСУ. 2012. № 1. С. 141–150.
3. Leonova A. V., Lomakina K. M., Dmitrieva S. A., Baranova A. V. Geotechnical properties of gullying in Tomsk oblast // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2016. Vol. 43. Article number 012037. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/43/1/012037>
4. Леонова А. В. Факторы оврагообразования в районе строительства Северной АЭС в Томской области // Проблемы геологии и освоения недр: труды XIII Междунар. симпозиума. Томск: Изд-во ТПУ, 2009. С. 206–207.
5. Осинцева Н. В. Природные условия развития овражной эрозии на территории г. Томска // География и природопользование Сибири: сб. ст. Барнаул: Изд-во АлтГУ, 2002. С. 126–137.
6. Осинцева Н. В. Овраги г. Томска // Проблемы геологии и освоения недр: труды IV Междунар. науч. симпозиума. Томск: Изд-во НТЛ, 2000. С. 214.
7. Ghorbanzadeh O., Feizizadeh B., Blaschke T. An interval matrix method used to optimize the decision matrix in AHP technique for land subsidence susceptibility mapping // Environmental Earth Sciences. 2018. Vol. 77. Article number 584. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7758-y>
8. Gudiyangada Nachappa T., Tavakkoli Piralilou S., Ghorbanzadeh O., Shahabi H., Blaschke T. Landslide Susceptibility Mapping for Austria Using Geons and Optimization with the Dempster-Shafer Theory // Applied Sciences. 2019. Vol. 9 (24). Article number 5393. <https://doi.org/10.3390/app9245393>
9. Gudiyangada Nachappa T., Kienberger S., Meena S. R., Hölbling D., Blaschke T. Comparison and validation of per-pixel and object-based approaches for landslide susceptibility mapping // Geomatics, Natural Hazards and Risk. 2020. Vol. 11. № 1. P. 572–600. <https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1736190>
10. Guzzetti F., Reichenbach P., Ardizzone F., Cardinali M., Galli M. Estimating the quality of landslide susceptibility models // Geomorphology. 2006. Vol. 81. P. 166–184. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.04.007>

11. Ivanova E. Landslide Susceptibility Mapping using Frequency Ratio and Analytic Hierarchy Process (AHP): Comparative study of two areas in Bulgaria // Analysis and Management of Changing Risk for Natural Hazards: Proceedings of the International Conference (18–19 Nov., 2014, Padua, Italy). Padua. 2014. pp. AP23-1–AP23-9. <https://www.researchgate.net/publication/318589814>
12. Rasyid A. R., Bhandary N. P., Yatabe R. Performance of frequency ratio and logistic regression model in creating GIS based landslides susceptibility map at Lompobattang Mountain, Indonesia // Geoenvironmental Disasters. 2016. Vol. 3. Article number 19. <https://doi.org/10.1186/s40677-016-0053-x>
13. Zhang Y. X., Lan H. X., Li L. P., Wu Yu. M., Chen J. H., Tian N. M. Optimizing the frequency ratio method for landslide susceptibility assessment: A case study of the Caiyuan Basin in the southeast mountainous area of China // Journal of Mountain Science. 2020. Vol. 17. P. 340–357. <https://doi.org/10.1007/s11629-019-5702-6>
14. Zhuang J., Peng J., Zhu X., Li W., Ma P., , Liu T. Spatial distribution and susceptibility zoning of geohazards along the Silk Road, Xian-Lanzhou // Environmental Earth Sciences. 2016. Vol. 75. Article number 711. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5428-5>
15. Покровский Д. С., Кузеванов К. И. Гидрогеологические проблемы строительного освоения территории Томска // Обской вестник. 1999. № 1-2 С. 96–104.
16. Lee S., Thalib J. A. Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis // Environmental Geology. 2005. Vol. 47. P. 982–990. <https://doi.org/10.1007/s00254-005-1228-z>
17. Saaty T. L. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation. N. Y.: McGraw-Hill International Book Company, 1980. 287 p.
18. Linden A. Measuring diagnostic and predictive accuracy in disease management: An introduction to receiver operating characteristic (ROC) analysis // Journal of Evaluation in Clinical Practice. 2006. Vol. 12, issue 2. P. 132–139. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2753.2005.00598.x>

*Статья поступила в редакцию 14 декабря 2020 года*

# Assessment of gully erosion on the territory of Tomsk using GIS technologies

Anna Vladimirovna LEONOVA\*

Lyudmila Aleksandrovna STROKOVA\*\*

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

## Abstract

**Relevance and purpose of the work.** Currently, the area of development of Tomsk is increasing. New neighborhoods are growing on previously undeveloped land (for example, on the left bank of the river Tom). The central part of the city is being redeveloped and reconstructed. It is impossible to develop a high-quality territory without taking into account the dynamics, mechanisms, factors and patterns of development of dangerous natural and technological processes, the forecast of their development. The purpose of the work is to establish the patterns of gully erosion, assess the intensity of its development, and predict the probability of its occurrence within the new city boundaries.

**Methods of research.** We performed an assessment and forecast of the development of gully erosion in Tomsk using GIS technologies, which are an important tool in the city management process due to their ability to process and analyze multidimensional data about the geological environment. We compared the traditional model of data-driven frequency ratio (FR) and expert-based multi-criteria assessment, i.e. analytical hierarchical process by weighting of gully conditioning factors.

**Results of the work.** We constructed a map of the distribution of gullies on the territory of the city, including 23 polygons. These polygons were then randomly divided into training (16 polygons or 70%) and validation data (7 polygons or 30%). We used seven gully-conditioning factors for the two models to produce gully susceptibility maps: slope angle, slope aspect, curvature, elevation, geological structure of the territory; types of filtration sections; distance to the river, to analyze the spatial patterns that determine the development of gully erosion. The spatial correlation between gully locations and the conditioning factors were identified using GIS-based statistical models. We constructed gully susceptibility maps based on the ranking of each factor by two methods using a training data set. Receiver operating characteristics (ROC) were used to validate the resulting susceptibility maps. The area under the curve (AUC) was 0.905 for the AHP model and 0,800 for the FR model, respectively, which indicates excellent and high quality of forecast maps. We proved that both methods are beneficial for assessment the susceptibility of the territory to gully erosion.

We recommend using the constructed maps for regional planning and hazard mitigation, as well as in education by teaching the discipline "Engineering geodynamics".

**Keywords:** gully, susceptibility, mapping, frequency ratio, analytical hierarchical process, ROC curve analysis.

## REFERENCES

1. Olkhovatenko V. E., Rutman M. G., Lazarev V. M. 2005, *Opasnye prirodnye i tehno prirodnye processy na territorii g. Tomsk i ih vliyanie na ustojchivost' prirodno-tehnicheskikh sistem* [Dangerous natural and technological processes on the territory of Tomsk and their impact on the stability of natural and technical systems]. Tomsk, 152 p.
2. Olkhovatenko V. E., Lazarev V. M., Filimonova I. S. 2012, *Geoekologicheskie problemy zastrojki territorii g. Tomsk i meroprijatija po ee inzhenernoj zashhite* [Geoecological problems of development of the territory of Tomsk and measures for its engineering protection]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk state University of architecture and construction], no. 1, pp. 141–150.
3. Leonova A. V., Lomakina K. M., Dmitrieva S. A., Baranova A. V. 2016, Geotechnical properties of gullying in Tomsk oblast. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 43. Article number 012037. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/43/1/012037>
4. Leonova A. V. 2009, Faktory ovragoobrazovaniya v rajone stroitel'stva Severskoj AJeS v Tomskoj oblasti [Factors of gully formation in the area of construction of the Seversk NPP in the Tomsk region]. *Problemy geologii i osvoeniya nedr: trudy XIII Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Problems of Geology and development of mineral resources: Proceedings of the XIII international Symposium]. Tomsk: TPU Publishing house, pp. 206–207.
5. Osinceva N. V. 2002, *Prirodnye usloviya razvitiya ovrazhnoj jerozii na territorii g. Tomsk* [Natural conditions for the development of gully erosion on the territory of Tomsk]. *Geografija i prirodopol'zovanie Sibiri* [Geography and nature management of Siberia]. Barnaul, pp. 126–137.
6. Osinceva N. V. 2000, *Ovragi g. Tomsk* [Gullies of Tomsk]. *Problemy geologii i osvoeniya nedr: mruudy Chetvertogo Mezhdunarodnogo nauchnogo simpoziuma* [Problems of Geology and subsoil development: Proceedings of the Fourth international scientific Symposium]. Tomsk: TPU Publishing house, p. 214.
7. Ghorbanzadeh O., Feizizadeh B., Blaschke T. 2018. An interval matrix method used to optimize the decision matrix in AHP technique for land subsidence susceptibility mapping. *Environmental Earth Sciences*, vol. 77. Article number 584. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7758-y>
8. Gudiyangada Nachappa T, Tavakkoli Piralilou S., Ghorbanzadeh O., Shahabi H., Blaschke T. 2019, Landslide Susceptibility Mapping for Austria Using Geons and Optimization with the Dempster-Shafer Theory. *Applied Sciences*, vol. 9 (24). Article number 5393. <https://doi.org/10.3390/app9245393>

\*avleonova@tpu.ru

\*\*sla@tpu.ru

9. Gudiyangada Nachappa T., Kienberger S., Meena S. R., Hölbling D., Blaschke T. 2020, Comparison and validation of per-pixel and object-based approaches for landslide susceptibility mapping. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, vol. 11, no. 1, pp. 572–600. <https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1736190>
10. Guzzetti F., Reichenbach P., Ardizzone F., Cardinali M., Galli M. 2006, Estimating the quality of landslide susceptibility models. *Geomorphology*, vol. 81, pp. 166–184. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.04.007>
11. Ivanova E. 2014, Landslide Susceptibility Mapping using Frequency Ratio and Analytic Hierarchy Process (AHP): Comparative study of two areas in Bulgaria. Analysis and Management of Changing Risk for Natural Hazards: Proceedings of the International Conference, 18–19 Nov., Padua, Italy. 2014. pp. AP23-1–AP23-9. <https://www.researchgate.net/publication/318589814>
12. Rasyid A. R., Bhandary N. P., Yatabe R. 2016, Performance of frequency ratio and logistic regression model in creating GIS based landslides susceptibility map at Lompobattang Mountain, Indonesia. *Geoenvironmental Disasters*, vol. 3. Article number 19. <https://doi.org/10.1186/s40677-016-0053-x>
13. Zhang Y. X., Lan H. X., Li L. P., Wu Yu. M., Chen J. H., Tian N. M. 2020, Optimizing the frequency ratio method for landslide susceptibility assessment: A case study of the Caiyuan Basin in the southeast mountainous area of China. *Journal of Mountain Science*, vol. 17, pp. 340–357. <https://doi.org/10.1007/s11629-019-5702-6>
14. Zhuang J., Peng J., Zhu X., Li W., Ma P., Liu T. 2016, Spatial distribution and susceptibility zoning of geohazards along the Silk Road, Xian-Lanzhou. *Environmental Earth Sciences*, vol. 75, article number 711. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5428-5>
15. Покровский Д. С., Кузеванов К. И. Гидрогеологические проблемы строительного освоения территории Томска // Обской вестник. 1999. № 1-2 С. 96–104.
16. Lee S., Thalib J. A. 2005, Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis. *Environmental Geology*, vol. 47, pp. 982–990. <https://doi.org/10.1007/s00254-005-1228-z>
17. Saaty T. L. 1980, *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. N. Y.: McGraw-Hill International Book Company, 287 p.
18. Linden A. 2006, Measuring diagnostic and predictive accuracy in disease management: An introduction to receiver operating characteristic (ROC) analysis. *Journal of Evaluation in Clinical Practice*, vol. 12, issue 2, pp. 132–139. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2753.2005.00598.x>

*The article was received on December 14, 2020*