

Введение. Оползни являются опасные экзогенные явления, которые оказывают серьёзное воздействие не только в виде угрозы разрушения инфраструктуры (разрушение дорог, инженерных сетей, жилых зданий и многое другое), негативных экологических последствий (изменение ландшафта, нарушение баланса природных экосистем и другие), но и принося риски для населения (травмы, гибель и прочее).

Актуальность исследования. Оползневые процессы для территории города Саратова представляют серьёзную опасность, так как в последние десятилетия приобретают особую остроту, оказывая негативное влияние на городскую инфраструктуру, жилые районы и безопасность населения. Оползни, угрожающие инфраструктуре и жизнедеятельности человека, вызваны не только природными процессами, но и антропогенным фактором, обусловленным неправильным использованием территории.

В связи с этим, *целью магистерской работы* является исследование и анализ оползневой опасности на территории г. Саратова с использованием геоинформационных технологий и метода энтропии Шеннона.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

- Провести анализ и оценку факторов, влияющих на оползневой риск;
- Выявить оползневую опасность на территории с помощью ГИС-технологий;
- Провести оценку уязвимости территории для возникновения оползней для г. Саратова;
- Проанализировать проведённые противооползневые мероприятия.

Защищаемое положение: энтропия Шеннона, дополненная геоинформационными технологиями, позволяет повысить достоверность модели оползневой опасности на территории г. Саратова.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались описательный метод, анализ литературных источников и источников сети Интернет по теме исследования, картографический метод, обобщение полученных данных.

Работа состоит из введения, трех разделов, пяти таблиц, 18 рисунков, заключения, списка источников и приложений.

Основное содержание работы

1 Инженерно-геологический анализ территории г. Саратова

Первый раздел включает в себя изучение геологического строения и геоморфологический форм территории, анализ инженерно-геологических условий, исследование оползневых процессов.

Геологическое строение Саратова играет ключевую роль в понимании природных процессов региона. В районе Саратовской котловины залегают породы архей-протерозойского, палеозойского, мезокайнозойского возрастов [1,2]. На территории Саратова выделяются две денудационные равнины: олигоценного и раннеплейстоценового возраста. Геоморфологические формы рельефа, такие как речные долины, ледниковые формы и оползневые склоны, позволяют восстановить историю геологических и климатических изменений региона.

Для комплексного изучения оползневой опасности необходимо также рассмотреть инженерно-геологические условия города. Инженерно-геологические условия Саратова определяются комплексом факторов, влияющих на строительство и эксплуатацию объектов. К ним относятся: рельеф, состав и залегание горных пород, гидрогеологические условия и геологические процессы (оползни, карст, суффозия, землетрясения).

Анализ инженерно-геологических условий является ключевым этапом для оценки рисков и разработки мер по минимизации негативных последствий [3].

В Саратове встречаются различные типы оползней, обусловленные сочетанием природных (близость Волги и водохранилища, рельеф, состав пород) и антропогенных факторов (застройка склонов, неконтролируемый полив). Выделяют оползни береговой зоны водохранилища (Затон, Увек и другие), оползни на уступах плато (Октябрьское и Смирновское ущелья и другие) и оползни в овражно-балочной сети (овраги Алексеевский, Глебучев, Маханский и другие) [4, 5].

Оползни классифицируются по мощности (малые, средние, крупные, очень крупные), крутизне поверхности скольжения (очень пологие, пологие, крутые), глубине залегания поверхности скольжения (поверхностные, мелкие, глубокие, очень глубокие) и механизму движения (выдавливания, скольжения, вязко-пластичные, смешанные).

В Саратове наблюдается широкое распространение оползней, требующее дальнейшего анализа их распределения и динамики. Они обусловлены как природными (геология, рельеф, гидрология), так и антропогенными факторами (застройка, полив).

В городе выделяется 3 оползневых зоны: Соколовогорская, Лысогорская и Увекская [5, 6].

Оползневые процессы представляют серьезную угрозу для социально-экономического благополучия и экологии. Необходимо изучать инженерно-геологические условия, распределение и динамику оползней, а также применять методы мониторинга и оценки для управления рисками.

2 Методы мониторинга и оценки оползневых процессов

Второй раздел включает в себя обзор современных геоинформационных систем и дистанционных методов мониторинга оползней, использование метода Анализа Иерархий (АИР) для оценки оползневых рисков, применение метода Соотношения частотностей (Frequency Ratio, FR) для выявления связей между оползневыми факторами, анализ и оценка оползневого риска с использованием ГИС-технологий и метода энтропии Шеннона.

Мониторинг оползней, являющийся частью государственного мониторинга состояния недр, необходим для обеспечения безопасности населения и объектов. Он включает в себя выявление опасных участков, наблюдение за деформациями склонов, оценку активности оползней, прогнозирование их развития и разработку мер по снижению ущерба [7].

Для мониторинга применяются геодезические, гидрогеологические, геофизические и дистанционные методы, в том числе данные дистанционного зондирования (ДДЗ), которые позволяют точно определять местоположение и

характеристики оползней, а также отслеживать их динамику. Радарная интерферометрия, используемая в ДДЗ, обнаруживает даже незначительные деформации [8].

Сочетание ДДЗ и полевых исследований (геофизических, геодезических, GPS-датчиков, лазерного сканирования) позволяет получить наиболее полную картину оползневой опасности.

Геоинформационные системы (ГИС) – мощный инструмент для мониторинга оползней, интегрирующий данные из различных источников, включая спутниковые снимки, геодезические данные и данные о геологии и гидрологии. ГИС позволяет объединять и анализировать эти данные, выявляя скрытые связи и закономерности.

Дистанционное зондирование (ДДЗ) играет ключевую роль в идентификации, картографировании и мониторинге оползней. Космические снимки высокого разрешения предоставляют ценные данные для оценки оползневой опасности.

При анализе мультиспектральных снимков широко используется создание индексных изображений путём математических преобразований значений яркости в различных спектральных каналах, например индекс влажности почвы (SWI), используемый в ДДЗ, позволяет определить зоны повышенного риска оползней, отслеживать изменения влажности почвы и оценить влияние осадков.

К дистанционным методам мониторинга также относятся интерферометрический радар, лидар и спектральный анализ изображений.

Сочетание ГИС, ДДЗ и полевых исследований позволяет получить наиболее полную картину оползневой опасности [9,10].

Томас Саати разработал метод анализа иерархий (АНР) для решения сложных задач принятия решений. АНР структурирует задачи в виде иерархий, сравнивая альтернативные варианты по нескольким критериям.

Процесс АНР включает:

- Создание иерархии целей, включающей цель, критерии и альтернативы.

- Определение приоритетов элементов иерархии попарным сравнением.
- Расчет векторов приоритетов для каждого уровня иерархии.
- Проверка непротиворечивости экспертных оценок (индекс согласованности).
- Синтез локальных приоритетов для всей иерархии.

АНР позволяет учитывать материальные и нематериальные факторы, объективные данные и субъективные оценки. Метод широко применяется в планировании, приоритезации проектов и оценке рисков. При применении АНР для оценки оползневой опасности учитываются: экспозиция, углы наклона, геологическое строение, грунтовые воды и другие факторы. АНР помогает определить приоритеты факторов, влияющих на оползневую опасность, и принять обоснованные решения по управлению рисками.

Метод соотношения частотностей (FR) анализирует взаимосвязь между распределением оползней и различными факторами, выявляя корреляции между местами оползней и обуславливающими их факторами. FR предполагает, что будущие оползни могут возникнуть в тех же условиях, что и прошлые. Преимущества FR: простота, минимальные данные, применимость к различным данным. Недостатки: неточен в областях с ограниченными историческими данными. Чувствителен к выбору размера ячейки и пороговых значений [10].

Метод энтропии Шеннона, усовершенствованный метод соотношения частотностей, позволяет оценить степень хаоса и неопределенности в системе, например, при оценке риска оползней. Метод энтропии Шеннона использует формулы для расчета весовых индексов факторов, влияющих на возникновение оползней [11,12].

Интеграция ГИС и метода энтропии Шеннона позволяет комплексно анализировать и оценивать оползневый риск.

Преимущества метода: повышенная точность и надежность оценок риска. Возможность учитывать пространственную зависимость оползней. Возможность анализировать неопределенность в данных.

Недостатки: не дает прямой количественной оценки оползневой опасности. Ограничен в учёте нелинейных взаимосвязей.

Комплексный подход, сочетающий различные методы мониторинга и оценки, необходим для получения наиболее полной картины оползневой опасности.

3 Оценка оползневого риска для г. Саратова с использованием ГИС-технологий и метода энтропии Шеннона

Третий раздел включает создание и анализ картографической базы данных, включающей все ключевые факторы, влияющие на оползневые процессы в г. Саратове, подробный анализ основных факторов, влияющих на распределения оползневых процессов, прогнозирование будущего развития оползневой ситуации на основе текущих данных и тенденций, противооползневые мероприятия в городе и анализ их эффективности

Геоэкологический риск – это вероятность нарушения устойчивости окружающей среды, а оползневой риск – вероятность и масштабы оползней, а также их негативные последствия. Оползневой риск включает опасность возникновения оползня и уязвимость территории к его воздействию.

Оценка оползневого риска необходима для принятия мер по предотвращению и минимизации последствий оползней. В Саратове оползневые процессы представляют серьезную угрозу для жилых домов и инфраструктуры.

Для оценки оползневого риска в Саратове были использованы 13 факторов: геоморфологическая характеристика территории; генезис почвообразующих пород; нормализованный вегетационный индекс; ландшафтные зоны; евклидово расстояние до тальвежной сети; горизонтальное расчленение территории; грунтовые воды; индекс пересечённости местности; крутизна склона; экспозиция склона; топографический индекс влажности; евклидово расстояние до дорожной сети; кривизна склона. Метод энтропии

Шеннона, примененный для создания интегральной карты оползневого риска, показал, что наибольшее влияние на оползневые процессы в Саратове оказывают: геоморфология, генезис почвообразующих пород, расстояние до тальвежной сети и горизонтальное расчленение территории. Достоверность модели подтверждена методом ROC-кривой, показавшим высокую точность прогнозирования оползневых зон [13]. Анализ факторов оползнеобразования, особенно в Саратове, является ключевым для управления рисками.

Прогнозирование будущего развития оползневой ситуации довольно сложная задача, требующая комплексного подхода. Для этого важным остаётся полнота данных, а также анализ факторов оползнеобразования. Построенная карта оползневого риска на территории г. Саратова отражает следующие уровни риска: очень низкий (28%), низкий (32%), умеренный (14%), высокий (15%), очень высокий (10%). Очень высоким риском отмечена территория практически всего денудационного уступа Лысогорского массива районы подполивановки, по восточную сторону от ручья Малиновый, 10-й, 6-й, 5-й, 4-й, 3-й 2-й дачных, заводский (по ул. Дружбы, вдоль 3-й Свинцового проезда), склоны Октябрьского ущелья, по окраинам ул. Новоузенской, склоны Смирновского ущелья, территория областной больницы, 1,2,3,4,5-е Саратовские проезды, ул. Лысогорская, Нижняя и Верхняя Стрелковки, севернее пос. Тепличный, район Психиатрической больницы. Так же можно отметить зону Новый южный по ул. Брянская, пос. Лесопильный, пос. Нефтяной, микрорайон Соколовогорский идущая от по склону пересекая улицы – Мясницкая, Высока, Аэропорт до небольшого участка по ул. Навашина. Также территория, обращённая в сторону Волгоградского водохранилища (Затон), склоны оврагов Сеча, между оврагами Масленников и Алексеевский пересекая в некоторых местах ул. Усть-Курдюмскую, овраг Дудаковский. Участок около гипермаркета Лента по ул. Усть-Курдюмской. Высоким уровнем риска отмечается участок Красного моста.

Для проверки достоверности данного метода можно рассмотреть карту величин оползневого потенциала на территорию Саратова [14], на которой участки с наибольшей величиной потенциала совпадают с построенной картой

подверженности оползневой опасности, однако на ней имеются новые опасные зоны. Сравним также с картой подверженности оползневой опасности, построенной с помощью метода АНР, участки относящиеся к высокому уровню опасности совпадают, но большим плюсом является то, что в методе SE имеют более чёткие контуры.

Противооползневые мероприятия — это комплекс мер по предотвращению и ослаблению последствий оползней, включая разрушение зданий, нарушение инфраструктуры и угрозу жизни людей. Основные группы мероприятий: регулирование поверхностного стока; дренаж обводненных пород; перераспределение масс горных пород; защита от подмыва и размыва; закрепление масс горных пород; улучшение свойств горных пород; лесомелиоративные работы. В Саратове, несмотря на проведенные противооползневые мероприятия, проблема оползней не решена должным образом. Необходимо продолжать мониторинг и прогнозирование оползневых процессов для принятия своевременных мер по защите территории.

Заключение. В процессе проделанной работы были систематизированы существующие методы мониторинга оползневых процессов, подготовлена картографическая база по основным оползнеобразующим факторам, составлена карта оползневого риска, отражающая зоны разной степени опасности и проведена оценка уязвимости территории города для возникновения оползней. Исследование инженерно-геологических условий города позволило выявить ключевые факторы влияющие на оползневую опасность. Карта оползневого риска наглядно показала актуальность изучения оползневых процессов, так как участки высокого и очень высокого уровня риска занимают 25% территории. На них сосредоточены жилые, общественно-деловые и производственные зоны, а также объекты инженерной и транспортной инфраструктуры. Это означает, что оползни могут привести к серьёзным социальным и экономическим последствиям.

Зоны города Саратова, отмеченные очень высоким уровнем оползневого риска, являются критическими, так как на них сосредоточены жилые (Ж-1, 2, 4,

5), общественно-деловые (ОД-1, 2, 3) и производственные зоны (Р-1, 2, 3, 4, 9), объекты инженерной и транспортной инфраструктуры (П-1, Т-1, 3, И-1), зоны сельскохозяйственного использования (СХ-3) и зона специального назначения (СН-1). В результате активизации оползни могут привести к серьёзным социальным и экономическим последствиям.

Метод энтропии Шеннона, представляющий собой усовершенствованный метод соотношения частотностей, позволяет оценить степень хаоса, нестабильности и неопределённости в системе. Метод энтропии Шеннона с применением ГИС- технологий показал чёткие, оконтуренные участки. Зоны, где уже расположены оползни имеют очень высокий риск опасности, что говорит о рабочей модели. Метод был проверен кривой-ошибок и дал хорошие показатели. Однако у метода есть как преимущества, так и недостатки.

Несмотря на проведённые современные противооползневые мероприятия в Саратове, проблема оползней остаётся актуальной. Их эффективность пока не достигла желаемого уровня, и ситуация требует дальнейшего решения. Для дальнейшей борьбы необходимо проведение усиленного мониторинга, строгий контроль за освоением территории и другие.

Предупреждение оползней и минимизация их последствий — это задача, требующая комплексного подхода, объединяющего усилия всех заинтересованных сторон: органов управления, специализированных служб и общественности.

Список используемых источников

1. Геологическая карта, Лист М-38-IV, первое издание [Электронный ресурс]: Geolkarta.ru – URL: http://www.geolkarta.ru/list_200.php?idlist=M-38-IV (дата обращения: 22.09.2023). – Загл. с экрана. – Яз. рус.

2. Геологическая карта, Лист М-38-V, первое издание [Электронный ресурс]: Geolkarta.ru – URL: http://www.geolkarta.ru/list_200.php?idlist=M-38-V (дата обращения: 22.09.2023). – Загл. с экрана. – Яз. рус.

3. Инженерно-геологические условия г. Саратова: учеб. пособие /Токарский О.Г., Токарский А.О. Изд-во центр «Наука». Саратов, 2009

4. О Саратове [Электронный ресурс]: Mestoprozhivaniya.ru. – URL: <https://mestoprozhivaniya.ru/o-saratove/> (дата обращения: 25.11.2023). – Загл. с экрана. – Яз. рус.
5. Шешнёв, А.С. Часть I. Потенциальная оползневая опасность / А. С. Шешнёв, И. И. Мингалиева, // Недра Поволжья и Прикаспия. 2012. №71. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/chast-i-potentsialnaya-opolznevaya-opasnost> (дата обращения: 15.03.2024). – Загл. с экрана. – Яз. рус.
6. Шешнёв, А.С. Часть II. ДЕЙСТВУЮЩИЕ ОПОЛЗНИ / А. С. Шешнёв, И. И. Мингалиева, // Недра Поволжья и Прикаспия. 2012. №71. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/chast-ii-deystvuyuschie-opolzni> (дата обращения: 14.09.2023). – Загл. с экрана. – Яз. рус.
7. Понятие и сущность мониторинга с позиции системного подхода [Электронный ресурс]: Cyberleninka.ru. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ponyatie-i-suschnost-monitoringa-s-pozitsii-sistemnogo-podhoda> / (дата обращения: 25.11.2023). – Загл. с экрана. – Яз. рус.
8. Дистанционное зондирование земли [Электронный ресурс]: Cyberleninka.ru. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dstantsionnoe-zondirovanie-zemli> / (дата обращения: 23.04.2024). – Загл. с экрана. – Яз. рус.
9. Кащенко, Н. А. Геоинформационные системы: учебн. пос. для вузов / Н.А. Кащенко, Е.В. Попов, А.В. Чечин; Нижегород. гос. архитектур.- строит. ун-т – Н.Новгород: ННГАСУ, 2012. – 130 с.
10. Применение статистических методов на основе ГИС для оценки потенциального развития оползней в районе Шапа, Вьетнам [Электронный ресурс]: Cyberleninka.ru. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-statisticheskikh-metodov-na-osnove-gis-dlya-otsenki-potentsialnogo-razvitiya-opolzney-v-rayone-shapa-vietnam> (дата обращения: 28.05.2024). – Загл. с экрана. – Яз. рус
11. Клод Шеннон. Теория связи в секретных системах [Электронный ресурс]: Studfile.net. – URL: <https://studfile.net/preview/3719777> (дата обращения: 12.10.2023). – Загл. с экрана. – Яз. рус

12. Картирование оползневой восприимчивости с применением модели энтропии шеннона на основе гис для нурекского района республики Таджикистан [Электронный ресурс]: Researchgate.net. – URL: https://www.researchgate.net/publication/374784730_kartirovanie_opolznevoj_vospriimcivosti_s_primeneniem_modeli_entropii_sennona_na_osnove_gis_dla_nurekского_rajona_respubliki_tadzikistan, (дата обращения: 10.01.2024). – Загл. с экрана. – Яз. рус.

13. Как интерпретировать кривую ROC [Электронный ресурс]: Codecamp.ru. – URL: <https://www.codecamp.ru/blog/interpret-roc-curve/>, (дата обращения: 10.03.2024). – Загл. с экрана. – Яз. рус.

14. Кузьмин, В.В. Оценка риска для территории г. Саратова вследствие проявления оползневых процессов / В.В. Кузьмин, Е.А. Тимофеева, Д.В. Чуносков // Журн. Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. 2010. №02. - С. 23-27.