



УДК 519.816+004.8(282.256.6)
<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2024.50.63>

Оценка опасности наводнений на участке реки Лены с использованием метода аналитической иерархии, ГИС и данных ДЗЗ

Т. А. Капитонова, Г. П. Стручкова, С. А. Тихонова, Л. Е. Тарская*

*Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН,
г. Якутск, Россия*

Аннотация. Отмечается, что активное использование спутниковых снимков, географических информационных систем, методов интеллектуального анализа данных привело к появлению новых методов оценки опасности наводнений, которые обычно превосходят более традиционные подходы. Указывается, что исходными материалами для построения предикторов и оценки опасности затопления послужили данные дистанционного зондирования, полученные из следующих открытых источников: Landsat 8-OLI, снимки ASTER GDEM. Достаточная точность метода аналитической иерархии и возможность интеграции с географическими информационными системами определила широкое использование подобных подходов для оценки риска чрезвычайных ситуаций природного происхождения. Доказывается, что геопространственные технологии обеспечивают наилучший потенциал для анализа и предоставления результатов, необходимых для оперативного и эффективного принятия решений о наводнениях. Предполагается, что карты риска наводнений могут быть эффективными инструментами для снижения ущерба от природных стихий.

Ключевые слова: природные чрезвычайные ситуации, карты риска наводнений, ГИС, данные дистанционного зондирования, метод аналитической иерархии.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания (регистрационный номер 1023030900073-8-2.3.3, научная тема FWRS-2024-0032) и Российского научного фонда, проект: 24-27-20095.

Для цитирования: Оценка опасности наводнений на участке реки Лены с использованием метода аналитической иерархии, ГИС и данных ДЗЗ / Т. А. Капитонова, Г. П. Стручкова, С. А. Тихонова, Л. Е. Тарская // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2024. Т. 50. С. 63–75. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2024.50.63>

Original article

Flood Hazard Assessment on the Lena River Section Using the Analytical Hierarchy Method, GIS and Remote Sensing Data

T. A. Kapitonova, G. P. Struchkova, S. A. Tikhonova, L. E. Tarskaya*

Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk, Russian Federation

Abstract. In the modern world, there is an increase in the number of natural and man-made disasters. In order to effectively cope with the rising costs associated with damage from them, decision makers need appropriate tools for assessing the risks of dangerous phenomena. Rapid response, spatial planning, and measures, both preventive and mitigation, play an important role in integrated disaster risk management. Floods are one of the main natural disasters that cause huge damage and threaten the safety of people's lives, property, and business facilities. It is noted that the active use of satellite images, geographic information systems, and data mining methods has led to the emergence of new methods for assessing flood hazards, which usually surpass more traditional approaches. It is indicated that the initial materials for the construction of predictors and assessment of the danger of flooding were remote sensing data obtained from the following open sources: Landsat 8-OLI, ASTER GDEM images. The sufficient accuracy of the analytical hierarchy method and the possibility of integration with geographic information systems have determined the widespread use of such approaches to assess the risk of natural emergencies. It is proved that geospatial technologies provide the best potential for analyzing and providing the results necessary for prompt and effective decision-making about floods. It is assumed that flood risk maps can be effective tools to reduce damage from natural disasters.

Keywords: natural emergencies, flood hazard maps, GIS, remote sensing data, analytical hierarchy process.

For citation: Kapitonova T.A., Struchkova G.P., Tikhonova S.A., Tarskaya L.E. Flood Hazard Assessment on the Lena River Section Using the Analytical Hierarchy Method, GIS and Remote Sensing Data. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2024, vol. 50, pp. . <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2024.50>. (in Russian)

Введение

Во всем мире наводнения относятся к числу наиболее опасных природных явлений, вызванных комплексом сложных климатических факторов, угрожающих экономике, здоровью и жизни людей и наносящих ущерб инфраструктуре и экологической устойчивости. Это обусловило то, что развитие и совершенствование методов прогноза наводнений, картографического и математического моделирования, расчета ущерба, создание карт риска наводнений являются актуальными направлениями в области снижения уровней опасности природно-техногенных чрезвычайных ситуаций.

Для Якутии наводнения во время весеннего половодья, как и природные пожары, являются одними из наиболее распространенных опасных природных явлений. Возможность прогнозирования заторов, участков их формирования и заторных уровней воды позволяет предпринять противопаводковые меры, эффективно распределить имеющиеся защитные и человеческие ресурсы. От своевременности превентивных мероприятий зависят масштаб последствий и размеры ущерба от весеннего паводка.

Известно, что за 15 лет, с 1998 по 2013 г., ущербы от последствий наводнений во время весеннего половодья на территории Якутии оцениваются примерно в 17 млрд руб. [Бурцева, Парфенова, 2015].

Одно из крупных – весеннее половодье 2001 г., когда уровень воды р. Лены на участке возле г. Ленска поднялся выше критического почти на 20 м. Затоплению подверглось более 98 % территории города. Более 3 тыс. домов были разрушены льдинами и мощным потоком воды. Более 30 тыс. человек стали жертвами разрушительных последствий наводнения. Всего пострадало почти 60 поселков и городов. Общий объем ущерба составил более 7 млрд руб., в том числе по г. Ленску более 6 млрд руб. [Бурцева, Парфенова, 2015] (рис. 1).

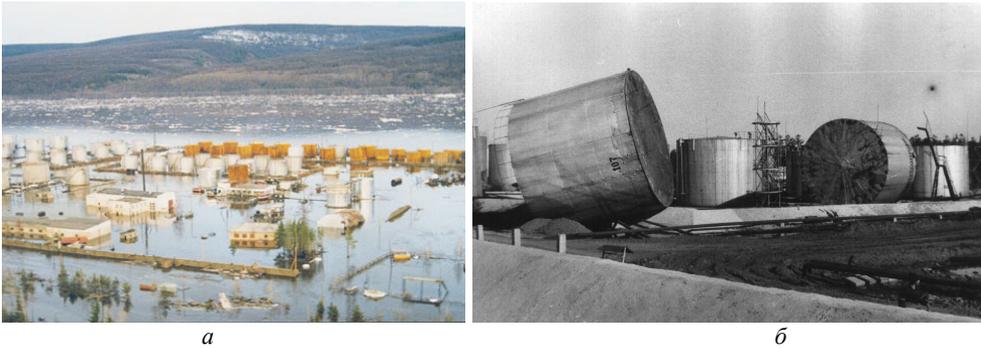


Рис. 1. Фото г. Ленска (а) и нефтебазы (б) во время наводнения 2001 г. [О восстановлении Ленской ... , 2003]

Самой крупной водной системой Якутии является р. Лена, которая течет с юга на север более 4 тыс. км. Площадь ее бассейна занимает 2490 тыс. км², средний расход воды составляет более 16 тыс. м³/с [Ноговицын, Кильмянинов, 2007].

Питание р. Лены является преимущественно снеговым, что определяет специфику водного режима. Количество зимних осадков, количество воды в снеге, интенсивность повышения температуры воздуха сказываются на максимальных уровнях воды во время половодья, величина которых может быстро расти при формировании и развитии ледовых заторов. Наивысшие уровни весеннего половодья наблюдаются при ледоходе или при заторах льда.

Продолжительность ледостава продолжается примерно семь месяцев. Длительность половодья начинается в первых числах мая и длится до второй декады июня. Происходит оно, как правило, с многочисленными заторами льда, которые сопровождаются быстрыми подъемами уровня воды и наводнениями. Заторы часто возникают на участках, имеющих определенные особенности строения берегов и разветвлений русла, островов, так называемых очагов заторообразования. В результате уровень воды может подниматься в среднем на 5–8 м над зимним уровнем [Ноговицын, Кильмянинов, 2007; Бурцева, Парфенова, 2015].

Определение факторов, влияющих на наводнения во время половодья, моделирование, оценка и прогнозирование возникновения и последствий природных катастроф являются сложными задачами, зависящими от большого количества разнородных данных. Основные трудности заключаются в слабо формализуемой и неполной фактической информации, сложности математической реализации и т. д.

Ряд известных советских и российских исследователей внесли значительный вклад в разработку и развитие методов, основанных на вероятностной теории описания речного стока как стохастического процесса [Картвелишвили, 1980; Коронкевич, Барабанова, Зайцева, 2010]. В их работах рассматривались, анализировались и классифицировались экстремальные гидрологические ситуации на территории России и других стран, была выявлена

роль природных и антропогенных факторов в их формировании, рассматривались возможности прогноза и ослабления ожидаемых негативных последствий. В данной статье для определения зон, подверженных риску наводнения, мы использовали спутниковые снимки, метод аналитического иерархического процесса (АНП) и взвешенную линейную комбинацию растров-предикторов в географической информационной системе.

Целью исследования является картирование риска наводнения во время весеннего половодья на участке р. Лены возле пос. Табага с использованием процесса аналитической иерархии, географических информационных систем (ГИС) и данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Объект исследования

Участок Табага был выбран исходя из расположения потенциально опасных объектов, которые могут оказаться в зоне затопления во время половодья. К таким критическим объектам в районе Табагинского мыса относится самый длинный подводный переход газопровода Хатассы – Павловск через р. Лену, длина которого более двух километров. Глубина реки в этом месте около 15 м.

Частота заторов и наводнений на данном участке превышает 0,8 (1/год). Во время весеннего половодья уже были зафиксированы случаи размыва грунта дна и берега реки, всплывтия и повреждения трубопровода, в 2016 г. всплывтие сопровождалось разрывом трубы.

Рядом с подводным переходом газопровода проектируется создание главного стратегического объекта транспортного строительства Республики Саха (Якутия) – автомобильного мостового перехода через р. Лену протяженностью 3,2 км.

Данные и методы

В литературе приводятся многочисленные тематические исследования оценки опасности наводнений [Ноговицын, Кильмянинов, 2007; Бурцева, Парфенова, 2015; Картвелишвили, 1980; Коронкевич, Барабанова, Зайцева, 2010; Ничепорчук, 2022; Москвичев, Симонов, 2008; Стручкова, Капитонова, Слепцов, 2022; Fernández, Lutz, 2010; Flood susceptibility mapping ... , 2023; Geographic information system ... , 2020; Rijal, Rimal, Sloan, 2018; Assessment of a Bayesian ... , 2010; Abebe, Kabir, Tesfamariam, 2018; Yun Chen, Rui Liu, Science of The Total ... , 2015; A novel approach ... , 2023], среди которых в последнее время появилось достаточное количество работ с использованием АНП. Этот метод хорошо комбинируется с ГИС и используется в качестве инструмента поддержки принятия решений для случаев многокритериальных задач, где необходимо учитывать много факторов [Fernández, Lutz, 2010; Ecological Indicators, 2023; Geographic information system ... , 2020; Rijal, Rimal, Sloan, 2018, A novel approach ... , 2023]. В среде ГИС АНП используется для вычисления весов, приписываемых слоям пространственных данных, представляющих критерии для создания карт. Важным шагом в оценке риска наводнений является выбор предикторов. Факторы, обуславливающие

наводнения, были определены с помощью обзора литературы, анализа результатов предыдущих работ авторов, экспертных оценок. Мы выделили пять предикторов, определяющих уровень потенциального риска затопления данного участка при условии превышения максимального уровня воды в реке критического значения. Эти факторы представляют собой: расстояние от водотоков, факторы рельефа (высоты и уклоны), тип объектов территории (вид растительности, пустыри, застройки), плотность населения. Обработка данных и визуализация были выполнены с использованием ГИС и данных ДЗЗ с пространственным разрешением 30 м, были определены классы для всех факторов. Диапазоны классов предикторов «плотность населения», «высота», «уклон», «тип объектов территории» были получены, используя метод естественных интервалов. Диапазоны первых трех в ArcGIS, четвертого – в результате классификации снимков Landsat. Метод естественных интервалов разбивает значения на классы таким образом, чтобы схожие значения оказались в одном классе. Объекты разделены на классы, границы которых установлены там, где существуют относительно большие различия в значениях данных. Диапазоны предикторов «расстояние от водотоков», «затопление по фактическим данным» были установлены вручную, исходя из литературных сведений, анализа предыдущих работ и консультаций с экспертами. Для построения предикторов, представляющих собой тематические растры, были использованы данные дистанционного зондирования, полученные из следующих открытых источников: Landsat 8-OLI с сайта EarthExplorer¹, снимки ASTER GDEM².

Факторы, обуславливающие потенциальный риск наводнения, более подробно представлены ниже.

Растр «Высота» был подготовлен путем преобразования цифровой модели рельефа (ЦМР) в треугольную нерегулярную сеть (TIN), а затем в растровые слои с помощью инструмента преобразования TIN to Raster ArcGIS. Мы также извлекли из ЦМР значения высоты (elevation), уклона (slop). Растровые слои «Уклонов» были определены с помощью ЦМР в инструменте генерации склонов в ArcGIS. Далее сделали переклассификацию на пять классов методом естественных интервалов в ArcGIS.

Растр «Расстояние от водотоков». Для определения расстояния от реки и ее протоков до всех ячеек входного растра использовался алгоритм Euclidean Distance из Spatial Analyst toolbox в ArcGIS. Получаем зонирование всей области исследуемого участка в пределах заданных расстояний от водотоков. Делаем переклассификацию на 5 классов, методом Natural Breaks в ArcGIS, вручную задавая расстояния.

Растр «Тип объектов территории». Для определения типов объектов, находящихся на территории, видов растительности, пустырей и застроек были использованы нормализованные дифференциальные индексы растительности (NDVI) по изображениям Landsat 8 (снимки за июнь 2020 г.).

¹ EarthExplorer. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov> (date of access: 23.04.2024).

² ASTER GDEM. URL: https://gdemdl.aster.jspacesystems.or.jp/index_en.html (date of access: 23.04.2024).

Растр «Плотность населения». Метод расчета общей плотности населения используется для определения количества человек на квадратный километр на территории Табаги и Старой Табаги. С этой целью была рассмотрена оценка средней численности населения за 2010–2017 гг. в каждом поселке³. Затем, используя данные из Единого государственного реестра недвижимости, отмечая жилые дома точками инструментом Point Density (Spatial Analyst Tools), была получена карта плотности застройки с. Табага и с. Старая Табага. Из расчета, что в среднем в семье пять человек, было определено среднее распределение населения по постройкам. Далее диапазон данных был разделен на пять классов, используя метод естественных интервалов, и переклассифицирован в порядке увеличения численности населения, исходя из предположения, что чем больше плотность населения, тем более уязвимым оно будет перед угрозой наводнений. Соответственно, классу с наивысшей плотностью населения присвоено значение 5, с наименьшей плотностью населения – 1.

Остальные растры-предикторы также были переклассифицированы на пять классов в порядке их влияния на уровень риска затопления территории. Очень низкой категории присвоена оценка 1, тогда как очень высокой – оценка 5, что указывает на очень низкий и очень высокий уровни риска наводнений соответственно, значения классов приведены в табл. 1. Обработка данных и визуализация были выполнены с использованием ГИС с растровыми данными (рис. 2).

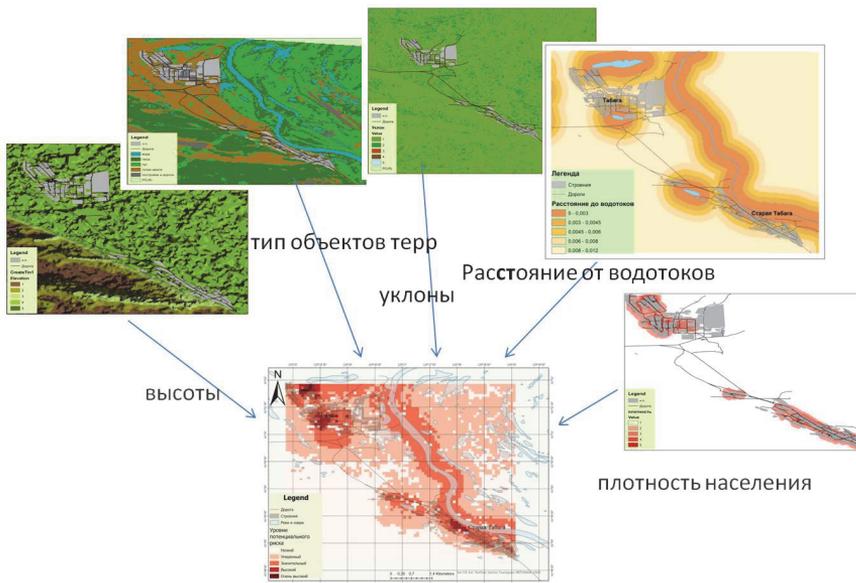


Рис. 2. Карта потенциального риска затопления территории и факторы, обуславливающие риск наводнения в исследуемом районе: высота над уровнем моря, тип объектов территории, уклон, расстояние от водотоков, плотность населения

³ Миграция населения Республики Саха (Якутия) за 2010–2017 гг. Якутск : Федер. служба гос. статистики по Респ. Саха (Якутия), 2018. 49 с.

Таблица 1

Значения классов после переклассификации растровых слоев в порядке усиления степени риска наводнений

Классы	Расстояние от водотоков, км	Высоты, см	Плотность, ч/км ²	Уклон, град.	Тип объектов территории
1 (очень низкая)	0,8–1,2	1900–2350	<8	80–90	Леса
2 (низкая)	0,6–0,8	1350–1900	8–10	70–80	Луга
3 (средняя)	0,4–0,6	950–1350	10–15	56–70	Голая земля
4 (высокая)	0,3–0,45	800–950	15–659	37–56	Постройки
5 (очень высокая)	0–0,3	300–800	>659	0–37	Вода

Далее была проведена проверка на взаимозависимость предикторов (мультиколленарность). Для оценки возможной взаимной корреляции предикторов были рассчитаны коэффициенты инфляции дисперсии (VIF), значения которых для данной работы находятся в интервале 1–1,149, что показывает отсутствие корреляции независимых переменных друг с другом, критические значения $VIF > 5$.

Процесс иерархического анализа, разработанный Саати [2008], представляет собой метод анализа и решения сложных проблем, связанных с несоизмеримыми данными и/или с несколькими критериями, путем установления их приоритетов. Принцип заключается в том, что он сравнивает пары факторов принятия решений, которые расположены в наборе иерархий, для присвоения весов. В АНР множественные попарные сравнения важности предикторов основаны на стандартизированной шкале из девяти уровней (1 – равная, 3 – умеренная, 5 – сильная, 7 – очень, 9 – чрезвычайно), которая предоставляет возможность сравнивать различные единицы измерения в иерархии. АНР позволяет соотносить важность одного критерия с другим с помощью матрицы попарного сравнения. Метод аналитической иерархии используется для вычисления весов предикторов, представляемых растровыми слоями пространственных данных, для создания комбинированных карт с помощью инструмента «взвешенного наложения» в ArcGIS.

Реализация метода состоит из следующих этапов: построение структуры иерархий; определение относительной важности предикторов, используя попарное сравнение Саати; расчет общего веса каждого фактора, а также проверка согласованности субъективных оценок.

Результат попарного сравнения по пяти предикторам может быть сведен в (5×5) оценочную матрицу A , в которой каждый элемент A_{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, n$) является коэффициентом весомости предикторов (табл. 2).

Матрица A является обратной, и баллы по диагонали равны 1, следовательно, требуются только $n \cdot (n - 1) / 2$ сравнений.

Качество результатов использования АНР зависит от согласованности оценок, полученных при попарном сравнении. Если попарные сравнения полностью согласованные, то веса могут быть получены путем нормализации любой из строк или столбцов матрицы A . Чтобы построить логически непротиворечивые решения при присвоении веса относительной важности критериев, используется коэффициент согласованности, который должен

быть меньше 0,1, чтобы доказать, что веса и приоритеты соответствуют друг другу; в противном случае следует проверить и откорректировать значения попарных сравнений [Саати, 2008].

Таблица 2

Матрица попарного сравнения A для определения зоны подверженности наводнениям

Предикторы	Расстояние от водотоков	Высота	Плотность населения	Уклон	Тип объектов территории
Расстояние от водотоков	1,00E+00	2,00E+00	2,00E+00	6,00E+00	6,00E+00
Высота	5,00E-01	1,00E+00	1,00E+00	5,00E+00	6,00E+00
Плотность населения	5,00E-01	1	1,00E+00	7,00E+00	8,00E+00
Уклон	1,67E-01	2,00E-01	1,43E-01	1,00E+00	2,00E-01
Тип объектов территории	0,167	0,167	1/8	5,00E+00	1

Согласованность определяется, используя следующие параметры: индекс соответствия (CI), индекс случайных значений (RI). CI рассчитывается, используя уравнение следующего вида:

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1), \quad (1)$$

где λ_{\max} – максимальное собственное значение матрицы; n – количество факторов.

Значение RI определяется из табл. 3 [Саати, 2008].

Таблица 3

Случайный индекс для вычисления коэффициента согласованности

Количество факторов, N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Случайный индекс RI	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Коэффициент согласованности CR представляет собой отношение CI к RI , выраженное в уравнении:

$$CR = CI / RI. \quad (2)$$

В нашем случае для матрицы 5×5 RI из табл. 3 составил 1,12, а CI был рассчитан из матрицы АНР с использованием уравнения (1). Вычисленный, используя выражение (2), $CR = 0,09$, что меньше стандартного значения 0,1, т. е. оценки, полученные при попарном сравнении, хорошо согласованы [Саати, 2008].

Относительная важность факторов, или весовые коэффициенты, задаются главным собственным вектором матрицы A , вычисляются по формуле:

$$W_i = \sum_{k=1}^n A_{jk}, \quad (3)$$

где W_i – веса для факторов; A_{jk} – коэффициенты матрицы, нормированные по столбцам. Результирующие нормализованные веса предикторов представлены в табл. 4.

Таблица 4
Результирующие нормализованные веса предикторов

Название	Значение веса
Расстояние от водотоков	0,374
Высота	0,239
Плотность населения	0,279
Уклон	0,037
Тип объектов территории	0,071

После вычисления весовых коэффициентов предикторов уровень риска рассчитывается с суммированием, используя инструменты ГИС, путем объединения весов со слоями пространственных данных для каждого показателя.

Результаты и обсуждения

Анализ полученных результатов показал, какие предикторы были связаны и насколько сильно с риском наводнений во время весеннего половодья.

В табл. 4 приведены результирующие нормализованные веса показателей. Наиболее важный показатель с точки зрения веса был определен как «расстояние от водотоков» – 0,374; следующими по важности были определены «плотность населения» – 0,279 и «высота» – 0,239. Слоям «тип объектов территории» и «уклон» были присвоены следующие значения весов: 0,071 и 0,037. Наименьший вклад в опасность наводнения вносит фактор «уклон». Затем были рассчитаны общие баллы с использованием простой взвешенной суммы. Рассчитанные веса, представленные в табл. 4, использовались в инструменте пространственного анализа > Наложение > Взвешенное наложение в ArcGIS. Соответственно, каждый пиксель выходной карты был рассчитан с применением следующего суммирования каждого слоя, умноженного на свой вес. Конечным продуктом аналитической иерархии стала карта подверженности затоплениям с пятью зонами, соответствующими уровням потенциального риска затопления (рис. 3). Площадь каждой зоны затопления в км² и процентах была рассчитана в ArcGIS.

Результаты расчетов показали, что большая часть территории участка 35,32 и 44,4 % находится в зоне низкого и умеренного риска наводнения соответственно, в то время как 19,17 и 1,04 % – в зонах значительного и высокого риска соответственно, 0,07 % – в зоне очень высокого риска. Применение этого подхода может помочь местным властям в определении приоритетных областей для мероприятий по борьбе с наводнениями. В дальнейшем возможно развитие данного подхода добавлением предикторов, например, карты грунтов, детализацией фактора «плотность населения» по возрасту и социальному положению и т. д.

Для оценки точности результатов построения карты риска наводнений использовали карту затоплений по фактическим данным, которая была подготовлена с применением архивных сведений мониторинга наводнений 1936–2016 гг. программы «Паводок» [Ничепорчук, 2022], анализа снимков Landsat на соответствующую уровню дату (рис. 4). В этом исследовании для оценки точности карты, подготовленной с помощью моделей на основе АНР, ДЗЗ и ГИС, использовали отношение суммы площадей затопляемых и не-

затапливаемых участков, полученных по модели АНР и совпавших с соответствующими частями фактической карты к общей площади территории, точность карты риска равна 0,6.

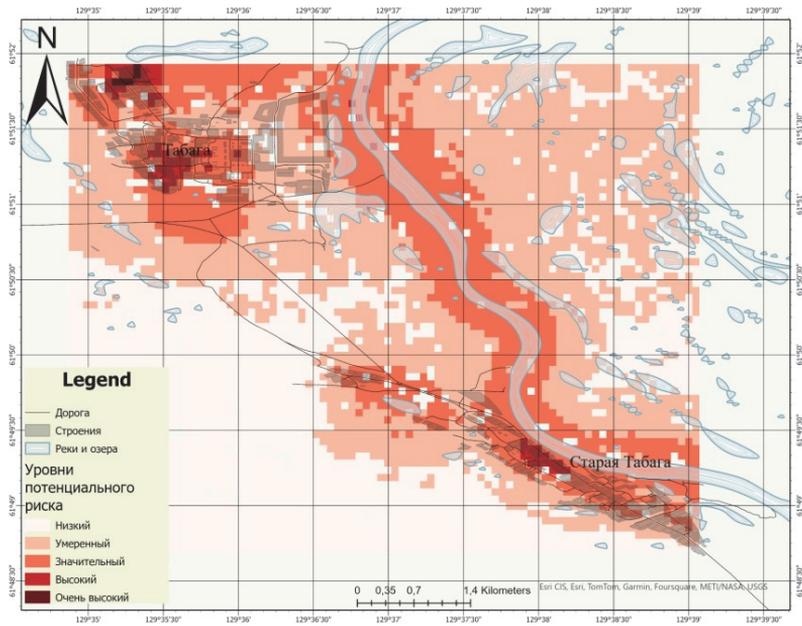


Рис. 3. Карта потенциального риска затопления территории

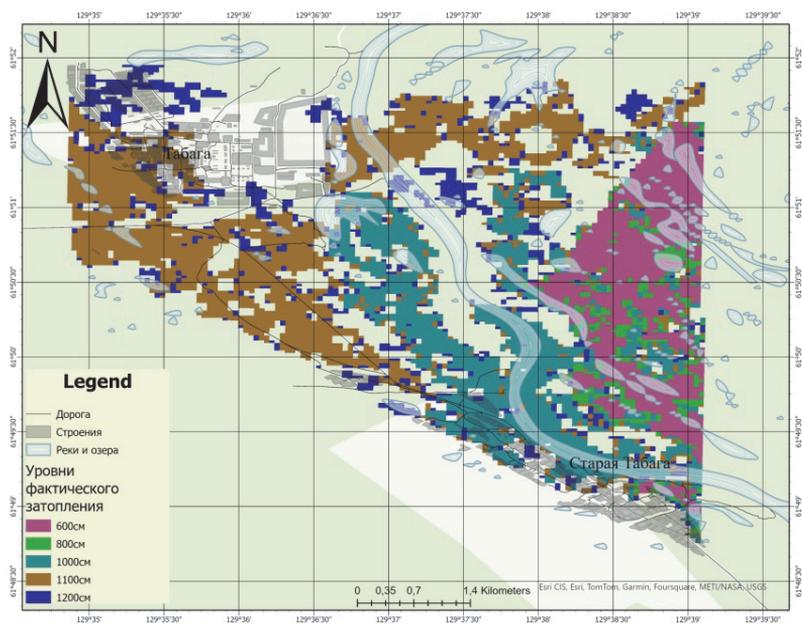


Рис. 4. Карта затоплений территории по фактическим данным

Выводы

Интегрированное использование ДЗЗ, ГИС и АНР является достаточно надежным методом оценки зон риска затопления, поскольку позволяет учитывать многочисленные факторы, обуславливающие затопление, и взвешивать предикторы, способствующие затоплению. В дальнейших работах планируется расширить количество предикторов, ввести в рассмотрение растры грунтов и использовать фактические данные по затоплениям.

На исследуемом участке рядом с подводным переходом газопровода проектируется создание главного стратегического объекта транспортного строительства Республики Саха (Якутия) – мостового перехода через р. Лену протяженностью 4,6 км. Строительство моста, скорее всего, вызовет интенсивный рост развития инфраструктуры и плотности населения. Риск наводнения определяется как вероятностью возникновения, так и его последствиями. В районах с высокой плотностью населения и их жизненно важной инфраструктурой ущербы от последствий могут быть очень тяжелыми. Карты потенциального риска затопления на территориях строительства являются значимыми инструментами при организации будущего направления роста населенных пунктов, могут быть полезны для планирования бюджета при подготовке к наводнениям и разработке стратегии реагирования, а также при реализации программ восстановления в пострадавшем районе. Кроме того, рассмотренные подходы, использованные в этом исследовании, можно использовать для комплексного городского планирования развивающихся населенных пунктов с точки зрения устойчивого развития.

Список литературы

- Бурцева Е. И., Парфенова О. Т.* Экономический ущерб от наводнений на реках Республики Саха (Якутия) // Проблемы современной экономики. 2015. № 1 (53). С. 256–259.
- Картвелишвили Н. А.* Стохастическая гидрология. Л. : Гидрометеиздат, 1980. 200 с.
- Коронкевич Н. И., Барабанова Е. А., Зайцева И. С.* Экстремальные гидрологические ситуации. М. : Медиа-ПРЕСС, 2010. 464 с.
- Москвичев В. В., Симонов К. В.* Статистические модели оценки опасности наводнений // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2008. № 4. С. 11–19.
- Ничепорчук В. В.* Ресурсы и технологии региональных информационно-аналитических систем природно-техногенной безопасности : дис. ... д-ра техн. наук. Новосибирск, 2022. 295 с.
- Ноговицын Д. Д., Кильмянинов В. В.* К вопросу о прогнозировании заторных явлений на реке Лена // Наука и техника в Якутии. 2007. № 1. С. 19–24.
- О восстановлении Ленской нефтебазы после наводнения 2001 г. / А. П. Аммосов, В. Б. Стрижов, Л. С. Белов, В. И. Макаренко // Наука – производству. 2003. № 8. С. 3–6.
- Саати Т. Л.* Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети : пер. с англ. / науч. ред. А. В. Андрейчиков, О. Н. Андрейчикова. М. : Изд-во ЛКИ, 2008. 360 с.
- Стручкова Г. П., Капитонова Т. А., Слепцов О. И.* Использование байесовских сетей для анализа рисков наводнений во время весеннего половодья на участке р. Лена возле п. Табага // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2022. № 5. С. 33–44. <https://doi.org/10.36535/0869-4176-2022-05-3>
- A novel approach for assessing flood risk with machine learning and multi-criteria decision-making methods / Shikhteymour Sharareh Rashidi, Borji Moslem, Bagheri-Gavkosh Mehdi [et al.] // Applied Geography. 2023. Vol. 158. P. 103035.
- A spatial assessment framework for evaluating flood risk under extreme climates / Yun Chen, Rui Liu, Damian Barrett [et al.] // Science of The Total Environment. 2015. Vol. 538. P. 512–523. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.094>

Abebe Y., Kabir G., Tesfamariam S. Assessing urban areas vulnerability to pluvial flooding using GIS applications and Bayesian Belief Network model // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 174. P. 1629–1641. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.066>

Assessment of a Bayesian Belief Network–GIS framework as a practical tool to support marine planning / V. Stelzenmüller, J. Lee, E. Garnacho, S. I. Rogers // *Marine Pollution Bulletin*. 2010. Vol. 60. Iss. 10. P. 1743–1754. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.06.024>

Fernández D. S., Lutz M. A. Urban flood hazard zoning in Tucumán Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis // *Engineering Geology*. 2010. Vol. 111, Iss. 1–4. P. 90–98. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.12.006>

Flood susceptibility mapping of Kathmandu metropolitan city using GIS-based multi-criteria decision analysis / Chaulagain Deepak, Rimal Parshu Ram, Ngando Same Noel [et al.] // *Ecological Indicators*. 2023. Vol. 154. P. 110653.

Geographic information system (GIS)-Based multicriteria analysis of flooding hazard and risk in Ambo Town and its watershed, West shoa zone, oromia regional State, Ethiopia Gemechu Shale / Amare Bantider [et al.] // *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2020. Vol. 27. P. 100659.

Rijal S., Rimal B., Sloan S. Flood hazard mapping of a rapidly urbanizing city in the foothills (Birendranagar, Surkhet) of Nepal // *Land*. 2018. Vol. 7, N 2. <https://doi.org/10.3390/land7020060>

References

Burceva E.I., Parfenova O.T. Ekonomicheskij ushcherb ot navodnenij na rekah Respubliki Saha (Yakutiya) [Economic damage from floods on the rivers of the Republic of Sakha (Yakutia)]. *Problemy sovremennoj ekonomiki* [Problems of modern economy]. 2015, no. 1 (53), pp. 256-259. (in Russian)

Kartvelishvili N.A. *Stokhasticheskaya gidrologiya* [Stochastic Hydrology]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ. 1980, 200 p. (in Russian)

Koronkevich N.I., Barabanova E.A., Zajceva I.S. *Ekstremal'nye gidrologicheskie situacii* [Extreme hydrological situations]. Moscow, Media-PRESS, 2010, 464 p. (in Russian)

Moskvichev V.V., Simonov K.V. Statisticheskiye modeli otsenki opasnosti navodnenij [Statistical models of the estimation of flood's risks]. *Problemy bezopasnosti i chrezvychajnykh situatsiy* [Safety and Emergency Problems], 2008, no. 4, pp. 11-19. (in Russian)

Nicheporchuk V.V. *Resursy i tekhnologii regionalnykh informatsionno-analiticheskikh sistem prirodno-tekhnogennoj bezopasnosti* [Resources and technologies of regional information-analytical systems of natural-technogenic safety]. Dr. sci. diss. Novosibirsk, 2022, 295 p. (in Russian)

Nogovitsyn D.D., Kilmyaninov V.V. K voprosu o prognozirovanii zatornykh yavlenij na reke Lena [To the question about forecasting of jamming phenomena on the Lena River]. *Nauka i tekhnika v Yakutii* [Science and Technology in Yakutia], 2007, no 1, pp. 19-24. (in Russian)

Ammosov A.P., Strizhov V.B., Belov L.S., Makarenko V.I. O vosstanovlenii Lenskoy neftebazy posle navodneniya 2001 [On the restoration of the Lena oil depot after the flood of 2001]. *Nauka – proizvodstvu* [Science – production], 2003, no 8. pp. 3-6. (in Russian)

Saati S., Tomas L. *Prinyatie reshenij pri zavisimostyah i obratnykh svyazyah: Analiticheskie seti*. [Decision Making with Dependencies and Feedbacks: Analytical Networks]. Ed. by Andrejchikov A.V., Andrejchikova O.N. Moscow, LKI Publ., 2008, 360 p. (in Russian)

Struchkova G.P., Kapitonova T.A., Sleptsov O.I. Ispolzovanie bajesovskih setej dlya analiza riskov navodnenij vo vremya vesennego polovod'ya na uchastke r. Lena vozle p. Tabaga [Using Bayesian networks to analyze flood risks during spring floods in the section of the Lena river near the village Tabaga]. *Problemy bezopasnosti i chrezvychajnykh situatsiy* [Safety and Emergency Problems], 2022, no. 5. pp. 33-44. <https://doi.org/10.36535/0869-4176-2022-05-3> (in Russian)

Rashidi Shikhteymour Sharareh, Moslem Borji, Mehdi Bagheri-Gavkosh et al. A novel approach for assessing flood risk with machine learning and multi-criteria decision-making methods. *Applied Geography*, 2023, vol. 158, pp. 103035.

Stelzenmüller V., Lee J., Garnacho E., Rogers S.I. Assessment of a Bayesian Belief Network–GIS framework as a practical tool to support marine planning. *Marine Pollution Bulletin*. 2010, vol. 60, iss. 10, pp. 1743-1754. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.06.024>

Yun Chen, Rui Liu, Damian Barrett et al. A spatial assessment framework for evaluating flood risk under extreme climates. *Science of The Total Environment*, 2015, vol. 538, pp. 512-523. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.094>

Abebe Yekenalem, Kabir Golam, Tesfamariam Solomon. Assessing urban areas vulnerability to pluvial flooding using GIS applications and Bayesian Belief Network model. *Journal of Cleaner Production*. 2018, vol. 174. pp. 1629-1641. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.066>

Fernández D.S., Lutz M.A. Urban flood hazard zoning in Tucumán Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis. *Engineering Geology*, 2010, vol. 111, iss. 1–4, pp. 90-98. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.12.006>.

Chaulagain Deepak, Rimal Parshu Ram, Ngando Same Noel et al. Flood susceptibility mapping of Kathmandu metropolitan city using GIS-based multi-criteria decision analysis. *Ecological Indicators*, 2023, vol. 154. p. 110653.

Shale Gemechu, Bantider Amare, Abebe Ketema et al. Geographic information system (GIS)-Based multicriteria analysis of flooding hazard and risk in Ambo Town and its watershed, West shoa zone, oromia regional State, Ethiopia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2020, vol. 27, pp. 100659.

Rijal S., Rimal B., Sloan S. Flood hazard mapping of a rapidly urbanizing city in the foothills (Birendranagar, Surkhet) of Nepal. *Land*, 2018, vol. 7, no. 2. <https://doi.org/10.3390/land7020060>

Сведения об авторах

Капитонова Тамара Афанасьевна

кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
Институт физико-технических проблем
Севера им. В. П. Ларионова СО РАН
Россия, 677980 г. Якутск, ул. Октябрьская, 1
e-mail: kapitonova@iptpn.ysn.ru

Стручкова Галина Прокопьевна

кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник
Институт физико-технических проблем
Севера им. В. П. Ларионова СО РАН
Россия, 677980, г. Якутск,
ул. Октябрьская, 1
e-mail: pandoramy8@list.ru

Тихонова Сардана Алексеевна

ведущий инженер,
Институт физико-технических проблем
Севера им. В. П. Ларионова СО РАН
Россия, 677980, г. Якутск,
ул. Октябрьская, 1
e-mail: sardankobeleva@gmail.com

Тарская Лина Егоровна

ведущий инженер
Институт физико-технических проблем
Севера им. В. П. Ларионова СО РАН
Россия, 677980, г. Якутск,
ул. Октябрьская, 1
e-mail: lina.tarskaya@mail.ru

Information about the authors

Kapitonova Tamara Afanas'evna

Candidate of Sciences (Physics and
Mathematics),
Leading Research Scientist
Larionov Institute of the Physical-Technical
Problems of the North SB RAS
1, Oktyabrskaya st., 677980, Yakutsk,
Russian Federation
e-mail: kapitonova@iptpn.ysn.ru

Struchkova Galina Proko'pnevna

Candidate of Science (Technical),
Leading Research Scientist
Larionov Institute of the Physical-Technical
Problems of the North SB RAS
1, Oktyabrskaya st., 677980, Yakutsk,
Russian Federation
e-mail: pandoramy8@list.ru

Tikhonova Sardana Alekseevna

Leading Engineer
Larionov Institute of the Physical-Technical
Problems of the North SB RAS
1, Oktyabrskaya st., 677980, Yakutsk,
Russian Federation
e-mail: sardankobeleva@gmail.com

Tarskaya Lina Egorovna

Leading Engineer
Larionov Institute of the Physical-Technical
Problems of the North SB RAS
1, Oktyabrskaya st., 677980, Yakutsk,
Russian Federation
e-mail: lina.tarskaya@mail.ru

Код научной специальности: 1.6.16

Статья поступила в редакцию 12.05.2024; одобрена после рецензирования 12.09.2024; принята к публикации 10.12.2024

The article was submitted May, 12, 2024; approved after reviewing September, 12, 2024; accepted for publication December, 10, 2024